



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

¿RESUELVE LA MECÁNICA CUÁNTICA
RELACIONAL EL PROBLEMA DE LA MEDICIÓN?

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Físico

PRESENTA:

Ricardo Muciño Gómez

TUTOR:

Dr. Elias Okon Gurvich

Ciudad de México, 2018





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi madre, de quien heredé el amor por la naturaleza
A mi padre, de quien aprendí la importancia del estudio
A mi hermano, con quien forjé el carácter discusivo
A Carolina quien me enseñó a escuchar
y siempre me escucho
A mis gatos.
Gracias a ustedes soy y seré.
Ricardo.*

Reconocimientos

Quiero agradecer a mi abuelo, que este día cumple 90 años de acumular sabiduría. A mi abuela que nos dejó hace medio año, pero su cariño prevalece entre nosotros. Agradezco a mi mamá, papá y hermano, ser el principal motor que me trajo aquí. Agradezco especialmente a Carolina por aprender juntos, a mis amigos de una década y las que restan, Vianey e Israel y a mis amigos de la universidad Andrés y Toño. También quiero agradecerles mucho a mis tíos Óscar y Chucha que me permitieron vivir en su casa más de un año y medio, ahorrándome horas diarias de trayecto.

Igualmente, quiero agradecer a mi asesor Elias, por su paciencia, su tiempo, su apoyo y por mostrarme otra forma de ver la física. Y por último quiero agradecer a quienes forman parte de mi jurado y han sido mis maestros: Jorge Hirsch, Héctor Hernández, Carlos Pineda y Daniel Sudarsky por leer este trabajo y darme sus críticas y comentarios que mucho aprecio.

A todos y todo, gracias.

1. Datos del alumno

Muciño

Gómez

Ricardo

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

310571164

2. Datos del tutor

Dr.

Elias

Okon

Gurvich

3. Datos del sinodal 1

Dr.

Daniel Eduardo

Sudarsky

Saoinz

4. Datos del sinodal 2

Dr.

Jorge Gustavo

Hirsch

Ganievich

5. Datos del sinodal 3

Dr.

Héctor

Hernández

Coronado

6. Datos del sinodal 4

Dr.

Carlos Francisco

Pineda

Zorrilla

7. Datos del trabajo escrito

¿Resuelve la Mecánica Cuántica Relacional el problema de la medición?

52 p

2018

Índice general

1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es la filosofía de la física?	1
2. La Mecánica Cuántica Estándar	5
2.1. Formalismo Estándar de la Mecánica Cuántica	5
2.2. El problema de la medición	7
2.2.1. El problema de las bases	11
2.3. ¿Tiene importancia científica buscar una teoría más satisfactoria?	11
2.3.1. En búsqueda de teorías alternativas	14
3. Mecánica Cuántica Relacional	15
3.1. Reformulación del problema de interpretación de la mecánica cuántica .	16
3.2. La mecánica cuántica es una teoría sobre información	17
3.2.1. El problema de la medición según Rovelli	17
3.2.2. Objeciones contra la Observación Principal	19
3.2.3. Discusión Central	20
3.2.4. Relación entre descripciones y el proceso de medición	22
3.2.5. Información	25
3.3. Reconstrucción de la Mecánica Cuántica	28
3.3.1. Conceptos Básicos	28
3.3.2. Los dos postulados principales	29
3.3.3. El observador observado y el colapso de la función de onda	30
3.4. Crítica al concepto de estado	31
4. Un mundo cuántico y... ¿Relacional?	33
4.1. Dos instancias del problema de la medición	34
4.2. Plausibilidad de los tres ingredientes	35
4.2.1. El ingrediente principal	36
4.2.2. El ingrediente de la indiferencia entre sistemas	36
4.2.3. El ingrediente de la mecánica cuántica como teoría completa . . .	37
4.3. ¿Cómo se defiende Rovelli de (A) y (B)?	37
4.3.1. ¿La relación entre descripciones en verdad es relativa?	40
4.3.2. Relatividad Especial y Mecánica Cuántica Relacional	41

ÍNDICE GENERAL

5. Conclusiones	43
A. Superposición Macroscópica	45
A.1. Evolución lineal	45
B. La Mecánica Cuántica Relacional	47
B.1. Posibles objeciones a la Observación Principal	47
Bibliografía	51

Introducción

*Por fin lo comprende mi corazón:
escucho un canto,
contemplo una flor...
¡Ojalá no se marchiten!*

Nezahualcóyotl

1.1. ¿Qué es la filosofía de la física?

La filosofía y la física fueron una misma en algunas épocas y culturas como parte del mismo anhelo. El filósofo o tlamatini (del náhuatl “el que sabe algo”) era quien ejercía el *amor por la sabiduría* o *philosophia* en griego como el conjunto de todas las ideas encaminadas a entender mejor nuestra existencia, la del universo y el pensamiento mismo. Con el paso del tiempo el conocimiento se extendió demasiado y fue necesario separar las ramas de estudio. Surgió entre muchas otras la filosofía natural o la ciencia física como ahora le conocemos. Esta se concentraba únicamente en comprender la *naturaleza, aquello que llamamos realidad*, a partir de tres nociones primordiales que tenemos sobre ella: **El Espacio, el Tiempo y la Materia**.

*Aristóteles aportó a esta empresa especulativa con su nombre. El término “física” proviene del texto Aristotélico *Physike Akroasis: Lecciones sobre la Naturaleza*. En griego, *physis* se refiere a la naturaleza de una cosa, y Aristóteles definió la naturaleza de un objeto como una fuente interna de movimiento y reposo que pertenece a un objeto ante todo y propiamente y no accidentalmente.*¹- Tim Maudlin

¹A lo largo de este trabajo se encontrarán citas traducidas personalmente cuya versión en su idioma original se encontrará como pie de página, si la cita es pequeña y de menor importancia se omitirá. La

1. INTRODUCCIÓN

El sustantivo de ciencia, del latín *scientia* (conocimiento), se debe a que la única sabiduría admitida en esta manera de pensar será a través de la observación y adquisición de datos y su consecuente uso para la construcción de un aparato lógico (y matemático para la ciencia física) que aparte de consistente deberá reproducir las observaciones ya conocidas (en el caso menos afortunado) y nos permitirá hacer predicciones sobre futuras observaciones (en el caso más agraciado). Estas observaciones y la adquisición de datos serán **los experimentos** y los aparatos matemáticos serán **las teorías**. Entre estas últimas tenemos como ejemplos muy conocidos: la **Relatividad Especial y General** (sobre la naturaleza del espacio y el tiempo), la **Mecánica Cuántica** (sobre la naturaleza intrínseca de la materia) y la **Termodinámica** (sobre la naturaleza de la materia en grandes conglomerados), etcétera.

El conocimiento sobre el mundo continuó extendiéndose y apilándose a lo largo de las épocas, lo suficiente para que se produjera entonces una nueva división, esta vez entre los físicos que seguían teniendo el anhelo filosófico de entender el universo que nos rodea y los físicos con la prioridad de ampliar el alcance de sus teorías, anteponiendo los resultados que de esto se podían obtener al entendimiento que sobre el mundo podíamos adquirir. Así, se empezó a distinguir entre filosofía de la física y la ciencia física.

En los tiempos modernos el que hace filosofía de la física intenta comprender *lo que podemos decir sobre el mundo y lo que no* con las teorías que tenemos. Les cuestiona hasta la parte más fundamental, su misma construcción y estudia las consecuencias de modificar sus fundamentos. El filósofo de la física se hace el mismo tipo de preguntas generales que se hace un físico sobre la naturaleza pero con el propósito primordial de comprender con la mayor claridad posible el universo. [7]

Para esto, el filósofo de la física debe conocer con precisión lo que nos dicen las teorías sobre la porción de la naturaleza que desea estudiar. En este caso, si deseamos entender mejor la naturaleza de la materia en su forma más elemental (o microscópica), debemos conocer con precisión lo que nos dice la teoría cuántica sobre ella, conocer sus limitaciones y las consecuencias de modificarla con el fin de crear (o encontrar) nuestra mejor interpretación de la realidad.

Dicho lo anterior, en el siguiente capítulo se presentará de manera clara la formulación estándar de la mecánica cuántica, especificando el significado de cada postulado de modo que se vuelva completamente transparente el surgimiento del problema de la interpretación de la teoría y más precisamente el problema de la medición. Se describirá

cita original aquí es: Aristotle provided this speculative enterprise with its name. The term “physics” derives from the Aristotelian text *Physike Akroasis: Lectures on Nature*. In Greek, *physis* refers to the nature of a thing, and Aristotle defined the nature of an object as an internal source of motion and rest that belongs to an object primarily and properly and nonaccidentally.

el método de Maudlin para clasificar a las distintas propuestas que intentan resolver el problema y con ello motivar la idea de que buscar una solución no es un asunto únicamente de interés para los filósofos de la ciencia; algunas propuestas para interpretar la mecánica cuántica o reconstruirla pueden acarrear nueva física que por definición es de interés de los físicos. Con esto hecho se expondrá a profundo detalle la propuesta de Carlo Rovelli: La Mecánica Cuántica Relacional, denotando las razones por las que su autor piensa que es una buena solución al problema y finalmente se discutirá si esta realmente resuelve el problema de la medición y sus distintas versiones además de analizar el precio a pagar por asumir esta interpretación para finalmente evaluar si este precio es lo suficientemente pequeño para preferirla frente a otras propuestas.

En este primer capítulo se introdujo de manera muy breve a la filosofía de la física, preparando el suelo para sentar en el lugar correcto el campo de estudio del presente trabajo y en particular la propuesta novedosa que describe Rovelli. En el segundo capítulo se describe el formalismo estándar de la mecánica cuántica junto con la motivación principal que es el problema de la medición. En el capítulo 3 se expondrá la mecánica cuántica relacional incluyendo el punto de vista de su autor e intentando dejar más claro lo que quiso decirnos y lo que no, haciendo énfasis en las razones por las que cree que es una buena interpretación. En el capítulo 4 se analizará la propuesta y se discutirán las críticas que pueden surgir en contra de ella. Finalmente en el capítulo 5 se concluirá qué tanto vale pagar el precio de asumir esta interpretación con la intención de clarificar nuestro entendimiento del mundo cuántico, en especial si se compara este precio con respecto a las otras propuestas ya conocidas como las teorías de colapso objetivo (GRW) o la mecánica de Bohm.

La Mecánica Cuántica Estándar

*Por convención está el color
Por convención está la dulzura
Por convención la amargura
Pero en realidad... Sólo existen
Átomos y Espacio.*

Demócrito

En este capítulo se describirá la teoría cuántica como la aprendemos en libros de texto pero a partir de seis postulados esenciales. Se explicará cómo de estos postulados surge el problema de la medición y se justificará la gran importancia de resolverlo. Además se dará a conocer la clasificación que hace Maudlin en [6] para las propuestas que lo intentan . Y finalizaremos con una breve lista de lo que quisiéramos que cumpliera una teoría cuántica que logre evadir o resolver dicho problema. Todo esto se hará siguiendo de cerca el libro de David Albert [1], el artículo El problema de la medición en mecánica cuántica [9] de Elias Okon y el artículo [12] de Okon y Daniel Sudarsky.

2.1. Formalismo Estándar de la Mecánica Cuántica

La mecánica cuántica es la teoría que se construyó casi en su totalidad a lo largo de los primeros 30 años del siglo XX. Se hizo con el deseo de entender la materia desde la visión más fundamental que se podía pensar y los fenómenos que esta presentaba en la escala microscópica, dado que componía aparentemente todo aquello con lo que podíamos interactuar. Este proceso de construcción fue incentivado por la realización de experimentos que mostraron las limitaciones que tenían nuestras teorías clásicas; fenómenos físicos que no se lograban describir correctamente con las teorías ya existentes. [5]

2. LA MECÁNICA CUÁNTICA ESTÁNDAR

La edificación de la mecánica cuántica como la conocemos actualmente fue un proceso largo y tortuoso únicamente posible con las contribuciones de una gran cantidad de físicos de la más alta calidad en el mundo, cada uno agregando su pequeña aportación que por lo general venía acompañada de una interpretación deficiente. De este modo la teoría cuántica más bien parecía avanzar al ir desechando las ideas muy arraigadas e intuitivas que se tenían sobre cómo debía ser el mundo, ideas que al final generaban más problemas. La consecuencia de avanzar por este camino fue llegar a los años 30's con una teoría sobre la materia que portaba un número casi nulo de ideas que nos permitieran forjar una imagen o concepción clara sobre el mundo real a nivel microscópico, pero eso sí, con un conjunto de principios más parecido a un recetario o algoritmo sumamente exitoso para describir los resultados de los experimentos que se realizaban en los laboratorios. Este algoritmo es lo que hoy llamamos el formalismo estándar de la mecánica cuántica no relativista que podemos resumir en los siguientes seis enunciados:

1. **Representación de sistemas:** A todo sistema físico puede asociársele un espacio (de Hilbert) vectorial y a cada estado del sistema se le asocian vectores de dicho espacio llamados vectores de estado. En particular se usarán vectores unitarios y a cada uno le corresponderá un estado físico de modo que el conjunto de vectores contendrá todas las situaciones físicas posibles. Pero la correspondencia no es uno a uno, vectores con distinta fase necesariamente deberán representar el mismo estado físico.
2. **Representación de propiedades:** Las propiedades medibles de un sistema físico se conocerán como Observables y se representan por operadores hermitianos del espacio vectorial asociado al sistema. Dicho de otro modo, las observables se representan como mapeos lineales del espacio vectorial asociado en sí mismo.
3. **Propiedades definidas (Regla Eigenvalor/Eigenvector):** Un sistema poseerá el valor b_i para una propiedad representada por el operador B si y sólo si el estado corresponde a un eigenestado¹ $|b_i\rangle$ del operador B .
4. **Dinámica de Schrödinger:** El vector de estado de un sistema físico evoluciona en el tiempo de manera determinista y lineal de acuerdo a una ecuación diferencial parcial de primer orden (ecuación de Schrödinger). Es decir que dadas las condiciones de un sistema a un tiempo t_1 , podremos saber exactamente como evoluciona el vector de estado para un tiempo t_2 .

$$\hat{H} |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} \quad (2.1)$$

La linealidad en este caso implica que si los estados $|A\rangle$ y $|B\rangle$ del sistema al tiempo t_1 evolucionan a $|A'\rangle$ y $|B'\rangle$ al tiempo t_2 respectivamente, entonces el estado conformado por $\alpha |A\rangle + \beta |B\rangle$ evolucionará a $\alpha |A'\rangle + \beta |B'\rangle$ al tiempo t_2 .

¹Se dice que $|b\rangle$ es *eigenvector* de B con *eigenvalor* λ si sucede que $B|b\rangle = \lambda|b\rangle$, donde λ es algún número

5. **Resultados de las mediciones (Regla de Born):** Sea un estado del sistema físico representado por $|\psi\rangle$, supongamos que este vector no es un eigenestado del operador B (correspondiente a una propiedad del sistema). Entonces con la regla de Born podremos conocer la lista de los posibles valores que obtendremos al medir; que está compuesta de los eigenvalores de B . Y además podremos conocer la probabilidad de obtener cada valor; determinada por la ecuación

$$Pr(b_i) = |\langle\psi|b_i\rangle|^2 \quad (2.2)$$

donde $B|b_i\rangle = b_i|b_i\rangle$ y $\langle\psi|b_i\rangle$ es el producto interno de los vectores $|\psi\rangle$ y $|b_i\rangle$. Este principio es la conexión de la teoría con los experimentos y nos da información sobre los posibles valores de alguna propiedad a medir para un estado representado por un vector que no es eigenvector de dicha propiedad como en el caso de la regla Eigenvector/Eigenvalor.

6. **Colapso del estado (Medición):** Este último postulado indica que si realizamos una medición de una propiedad física representada por el operador B sobre un estado $|\psi\rangle$ y obtenemos el valor b_i , entonces este estado inicial del sistema se transformó en el eigenestado $|b_i\rangle$ que posee como eigenvalor a b_i . Este postulado también es una regla dinámica y contrasta matemáticamente con la primera siendo discontinua, no lineal e indeterminista.

Dado el postulado (3) sobre las propiedades definidas, podemos decir que las propiedades de un sistema cuyo estado no esté representado por un eigenvector, estarán indefinidas. Los fundadores de la teoría actual conectaron la regla E/E (3) con la regla de Born (5), de modo que los valores definidos para una propiedad tenían que coincidir con la predicción de las probabilidades para los resultados de las mediciones. Con el postulado del colapso de la función de onda (6) cumplieron una demanda primordial de la física: *La existencia de mediciones repetibles*. Por ejemplo, si medimos una propiedad representada por S de una partícula e y obtenemos el resultado $+z$, mediciones futuras en periodos lo suficientemente cortos, para no perturbar el sistema, obtendrán el mismo resultado $+z$. Sin embargo vemos que los estados **dependen de ser “medidos”**.

La mecánica cuántica estándar *necesita de físicos que decidan cuando ocurre una medición* o qué es de hecho una medición y de *observadores que puedan describir lo que hay en el mundo*, esto es en esencia lo mismo. Los padres fundadores de la teoría invocaron al observador y a un extraño proceso llamado medición para conectar las dos reglas de evolución (4 y 6).

2.2. El problema de la medición

En un inicio los filósofos naturales intentaron entender el mundo a su alrededor. En su intento se encontraron con la grandiosa idea de concebir situaciones simples

2. LA MECÁNICA CUÁNTICA ESTÁNDAR

*y artificiales en las que el número de factores involucrados se redujera al mínimo. Divide y conquistarás. Nació la ciencia experimental. Pero el experimento es una herramienta. El objetivo prevalece: entender el mundo. Restringir la mecánica cuántica exclusivamente a operaciones insignificantes en el laboratorio es traicionar la gran empresa. Una formulación seria no excluirá al gran mundo fuera del laboratorio.*¹- J.S.Bell

Se ha expuesto ya el algoritmo, los principios sobre los cuales reside la mecánica cuántica estándar. Sabemos que la teoría ha tenido un éxito experimental indiscutible; la totalidad de la química se sustenta en la teoría cuántica que explica desde enlaces atómicos y la formación de moléculas entre otras cosas hasta la fotosíntesis (que es tal vez el proceso energético más importante para entender la evolución de la vida como la conocemos actualmente), el estudio cuántico de los semiconductores permitió la invención del diodo y el transistor, aparatos que son parte de casi la totalidad de la electrónica moderna. Pero ¿el algoritmo actual es ambiguo o insuficiente para describir con claridad la porción del mundo que estudia? y si lo es ¿tiene importancia científica repararlo o construir uno nuevo que sea más claro? El propósito de esta sección será responder estas preguntas,

¿El algoritmo actual es ambiguo?

Como expusimos en la sección anterior, la mecánica cuántica estándar contiene dos principios fundamentales para la evolución de los sistemas, la dinámica de Schrödinger (que trata sobre cómo evolucionan los vectores de estado de los sistemas físicos en general) y el postulado del colapso (que trata sobre como evolucionan los vectores de estado de un sistema particularmente cuando interactúa con un aparato de medición). La ecuación de Schrödinger es determinista y lineal mientras que el colapso de la función de onda no lo es. Entonces, ¿Una teoría podría ser consistente si contiene dos maneras distintas para la evolución de los estados de un sistema? Por supuesto que sí, mientras la teoría explique con precisión en qué momento y de qué manera se debe de usar cada principio de evolución. Ahora, ¿Cómo explica esto nuestra teoría cuántica?

Como ejemplo, consideremos el siguiente experimento: Sea un electrón y un aparato de medición (que nos dice el espín de los electrones) que contiene dos orificios, uno de entrada, otro de salida (por donde viajará nuestra partícula) y además el aparato tiene una pantalla digital que marca su estado instantáneo. Es decir, la pantalla del aparato de medición marcará “On” cuando el dispositivo se encuentre listo para recibir un

¹In the beginning natural philosophers tried to understand the world around them. Trying to do that they hit upon the great idea of contriving artificially simple situations in which the number of factors involved is reduced to a minimum. Divide and conquer. Experimental science was born. But experiment is a tool. The aim remains: to understand the world. To restrict quantum mechanics to be exclusively about piddling laboratory operations is to betray the great enterprise. A serious formulation will not exclude the big world outside the laboratory.

electrón, marcará $+z$ cuando el electrón que ingrese porte espín $+z$ ¹ como se indica en la figura 2.1 y marcará $-z$ cuando el electrón que ingrese porte espín $-z$

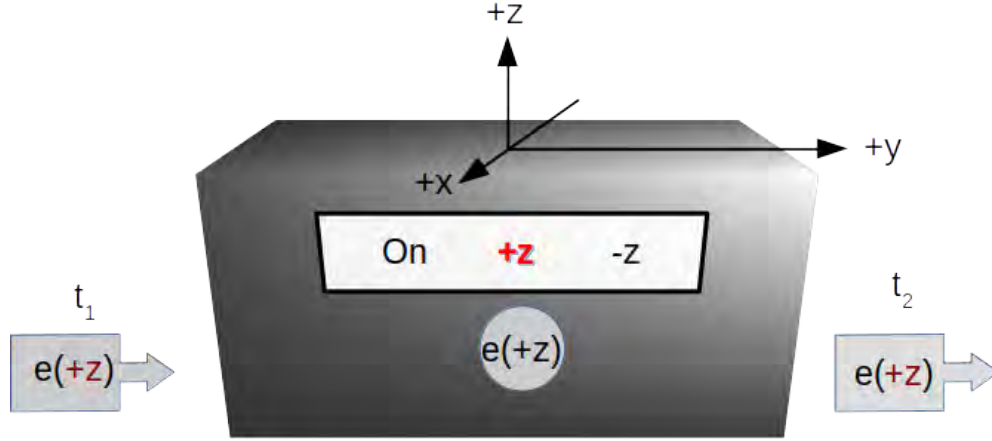


Figura 2.1: Aparato experimental, medición de espín $+z$.

Notemos que, según nuestra teoría y sus dos reglas de evolución: Si no se realiza una medición, el sistema compuesto por la partícula y el aparato evolucionará de acuerdo con la linealidad de la ecuación de Schrödinger², i.e.

$$\begin{aligned}
 & t_1 \xrightarrow{\text{Schrödinger}} t_2 \\
 & | +z \rangle_e \otimes | On \rangle_m \longrightarrow | +z \rangle_e \otimes | +z \rangle_m
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Ahora, si hacemos un nuevo experimento con un electrón preparado exactamente como antes pero ahora lo insertamos en un aparato de medición que como única diferencia con el anterior, lo habremos rotado en torno a la “dirección de movimiento de la partícula”, en particular lo rotaremos alrededor del eje y con un ángulo de $\pi/2$. Entonces una partícula idéntica a la usada anteriormente ingresará por el primer orificio con espín en dirección $+x$ (con respecto al nuevo sistema de referencia del aparato) y su vector de estado se representará en términos de la base del eje z por

$$| +x \rangle_e = \frac{1}{\sqrt{2}} (| +z \rangle_e + | -z \rangle_e) \tag{2.4}$$

¹Al decir que un electrón posee un espín “ $+z$ ” nos referimos a que hemos preparado, antes del experimento, un electrón por medio de otro aparato como el de la Fig.2.1 de modo que la partícula salió y la pantalla marcó “ $+z$ ”. Es decir que el electrón preparado porta un espín $1/2$ en la dirección $+z$ del sistema de referencia del aparato de medición

²Ver una descripción más detallada en el Apéndice A.

2. LA MECÁNICA CUÁNTICA ESTÁNDAR

Por lo cuál el algoritmo cuántico, en particular la regla de Born, nos dice que en el instante en que el aparato “mida” el espín en el eje z del electrón, tendremos dos posibles resultados (marcados en la pantalla), “+z” y “-z” con probabilidad 1/2 cada uno. Y la segunda regla de evolución (colapso) la podemos escribir para el caso especial en que la pantalla marque “+z” como sigue

$$\begin{array}{c}
 t_1 \xrightarrow{\text{colapso}} t_2 \\
 \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_e + |-z\rangle_e) \otimes |On\rangle_m \longrightarrow |+z\rangle_e \otimes |+z\rangle_m
 \end{array} \tag{2.5}$$

Pero la formulación estándar no especifica cuando ocurre una medición, ya que no define dicho proceso. Nos da la libertad de elegir al *sistema que efectuará la medición* y el *momento* en que esta ocurre. Es por esto que podemos más bien pensar que nuestro aparato que está compuesto por los mismos protones y electrones (partículas cuánticas en general), descritos por la teoría, no efectúa ninguna medición. La medición la hará (por ejemplo) una computadora que registrará el resultado que arroje el aparato. Así, el sistema ahora será un sistema que engloba a los anteriores, compuesto por la partícula cuántica y el aparato de medición, los cuales evolucionarán de acuerdo a la ec. de Schrödinger hasta que ahora la computadora *efectúe una medición* al tiempo t_3 . Entonces según esta idea al tiempo t_2 el sistema compuesto será descrito por

$$\begin{array}{c}
 t_1 \xrightarrow{\text{Schrödinger}} t_2 \\
 \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_e + |-z\rangle_e) \otimes |On\rangle_m \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_e \otimes |+z\rangle_m + |-z\rangle_e \otimes |-z\rangle_m)
 \end{array} \tag{2.6}$$

El resultado anterior es permitido por la teoría, sin embargo ¿qué significa que un aparato (macroscópico) se encuentre en una superposición en que su pantalla marque “+z” y “-z”?

Históricamente a este resultado se le dice obtener un *gato de Schrödinger* y a la libertad o ambigüedad que nos da la teoría para escoger al sistema que realiza la medición y lo que sea “medir” se le llama comúnmente *el problema de la medición*. Notamos entonces que la explicación que da la teoría sobre cuando aplica la dinámica de Schrödinger y cuando el postulado del colapso, sí es una explicación vaga que depende de lo que cada quién entienda por medición y eso está lejos de ser preciso ya que nos puede conducir a resultados totalmente distintos o peor aún, a resultados incomprensibles aún cuando describamos la misma secuencia de eventos, con los mismos sistemas físicos en juego y siendo nosotros el mismo científico que desea entender lo que sucede, simplemente cambiando de opinión con respecto a cuando ocurrió la medición.

Pero los problemas no acaban aquí, existe otro componente del problema de la medición. Como vimos explícitamente en el experimento descrito arriba, partículas con un mismo estado $|\psi\rangle_e$ (electrones con espín +1/2) pueden describirse con vectores de estado por distintas bases. Lo cual nos lleva a lo siguiente.

2.2.1. El problema de las bases

Ilustremos esto considerando un sistema cuántico S cuyo estado en la base asociada al observable representado por A está dado por

$$|\psi\rangle_S = \alpha |a_1\rangle_S + \beta |a_2\rangle_S \quad (2.7)$$

Consideremos también un aparato de medición M con el estado inicial $|On\rangle_M$ que interactúa con el sistema de la siguiente manera

$$|\psi\rangle_S |On\rangle_M = (\alpha |a_1\rangle_S + \beta |a_2\rangle_S) |On\rangle_M \xrightarrow{\text{Schrö}} \alpha |a_1\rangle_S |a_1\rangle_M + \beta |a_2\rangle_S |a_2\rangle_M \quad (2.8)$$

Pero de igual manera podemos escribir el estado $|\psi\rangle_S$ en la base del observable representado por el operador B

$$|\psi\rangle_S = \gamma |b_1\rangle_S + \delta |b_2\rangle_S \quad (2.9)$$

y en este caso la interacción con el aparato será de la forma

$$|\psi\rangle_S |On\rangle_M = (\gamma |b_1\rangle_S + \delta |b_2\rangle_S) |On\rangle_M \xrightarrow{\text{Schrö}} \gamma |b_1\rangle_S |b_1\rangle_M + \delta |b_2\rangle_S |b_2\rangle_M \quad (2.10)$$

Entonces, cuando realicemos el experimento ¿el estado final del aparato será por un lado $|a_1\rangle_M$ o $|a_2\rangle_M$ o por otro lado $|b_1\rangle_M$ o $|b_2\rangle_M$? Nuestra teoría no tiene una forma de responder esta pregunta a menos que información externa (por decir, que M de hecho mide A) sea *conocida por el experimentador*. Dado que esta información no está contenida en la descripción estándar de la situación (proporcionada por los estados cuánticos representados por sus respectivos kets), se concluye que la interpretación estándar no resuelve el llamado *problema de las bases*. [12]

En conclusión, el algoritmo actual sí es ambiguo. Pero como ya mencionamos, dicho formalismo estándar ha mostrado un éxito práctico indiscutible. Siendo así, nos preguntamos lo siguiente.

2.3. ¿Tiene importancia científica buscar una teoría más satisfactoria?

*Supongamos que al intentar una formulación más allá de todo fin práctico, nos encontramos con un dedo inamovible apuntando obstinadamente fuera del tema, a la mente del observador, a las escrituras Hindúes, a Dios, o incluso sólo a la Gravitación. ¿No sería eso muy interesante?*¹ - J.S.Bell [4]

¹Suppose that when formulation beyond FAPP is attempted, we find an unmovable finger obstinately pointing outside the subject, to the mind of the observer, to the Hindu scriptures, to God, or even only Gravitation? Would not that be very, very interesting?

2. LA MECÁNICA CUÁNTICA ESTÁNDAR

Para responder esta pregunta pensemos en algunas maneras de resolver el problema de la medición siguiendo la exposición de Maudlin. Sabemos que el proceso de medición es ambiguo para una teoría que buscamos sea fundamental. Deseamos una teoría que nos diga cómo usar concisamente la regla de evolución (cualquiera que sea) y que nos conduzca a resultados definidos cuando usamos aparatos macroscópicos o al menos nos diga por qué vemos resultados definidos, no queremos gatos de Schrödinger. Maudlin describe tres problemas de la medición: a) el problema de los resultados, b) el problema de la estadística y c) el problema del efecto. El problema a) Maudlin nos dice que surge de la incompatibilidad de los tres enunciados siguientes:

a.1 La función de onda del sistema es *completa*, i.e. la función de onda específica (directa o indirectamente) todas las propiedades físicas de un sistema.

a.2 La función de onda siempre evoluciona de acuerdo con una ecuación dinámica lineal (e.g. ecuación de Schrödinger).

a.3 Mediciones de, e.g. el espín de un electrón siempre (o al menos usualmente) tienen resultados definidos, i.e. al final de la medición el aparato que midió se encuentra en el estado que indica spin-arriba (y no abajo) o spin-abajo (y no arriba).

Para esto recordemos el experimento descrito arriba cuando rotábamos el aparato de medición. Si aceptamos a.2 la función de onda evoluciona de acuerdo con la ecuación de Schrödinger y llegamos a (2.6) entonces nos preguntamos qué significaba que un aparato macroscópico se encuentre en una superposición de estados clásicos (“+z” o “-z”). Si a.1 es correcto y la función de onda es completa, entonces esta función de onda debe especificar, directa o indirectamente, cada hecho físico sobre el aparato de medición. Pero Maudlin nos dice que simplemente por simetría (2.6) parece no poder describir un aparato de medición en el estado “+z” pero no “-z” o “-z” pero no “+z”. Ya que “+z” y “-z” entran simétricamente al estado final, ¿con qué argumento podríamos decir que este aparato se encuentra de hecho en uno de los dos estados y no en el otro? se pregunta Maudlin.

Entonces si a.1 y a.2 son correctos, a.3 debe fallar. Las mediciones de espín no siempre llegarán a resultados definidos. Dado que el problema de los resultados surge de la incompatibilidad de estos enunciados, Maudlin propone taxonomizar las soluciones a el por cuál o cuales enunciados abandonan. Las teorías que abandonen a.1 son llamadas generalmente de *variables ocultas* (o adicionales) ya que postulan más a la realidad física de lo que la función de onda representa como la Mecánica de de Broglie-Bohm.

Las teorías que abandonan a.2 generalmente son llamadas de *colapso* (o no lineales) ya que niegan que la evolución de la función de onda es siempre lineal. Tienen que explicar que al menos en algunos casos no es lineal y produce lo que llamábamos “colapsos” de la función de onda en las ecuaciones y no *en las palabras*. La teoría de colapso objetivo de Ghirardi, Rimini y Weber (GRW) es de este tipo.

Las teorías que mantienen a.1, a.2 y abandonan a.3 no son muy comunes. El ejemplo más sobresaliente es la teoría de Muchos Mundos que según Maudlin en algún sentido surge de la interpretación de estados relativos de Everett. En Muchos Mundos, al final de la medición el aparato indica los dos resultados, uno en un mundo y el otro en otro mundo. Pero esta no es la única forma de negar a.3, también podemos decir que el aparato de medición no indica nada al final de la medición. En resumen, podemos ver algunos caminos claramente visibles para resolver el problema de los resultados. Estos caminos son negar a.1, a.2 o a.3. Y Maudlin nos dice.

Cualquiera de estas opciones carga con ella una obligación, su descarga demanda la postulación de nueva física. El problema de la medición es algunas veces retratado como meramente filosófico o sin interés para la física. Esto es absolutamente falso.¹

Si uno se decide por una teoría de variables adicionales, tenemos que especificar cuáles son estas variables y qué leyes naturales las gobiernan. Si uno opta por una teoría no lineal, tenemos que especificar en términos matemáticos cuando y en qué manera la evolución deja de ser lineal. En las dos hay física nueva por investigar. Por esto concluimos que sí tiene absoluta importancia científica buscar teorías que resuelvan el problema de la medición.

El problema a) de Maudlin es sólo otra manera de presentar el problema que presentamos en la sección 2.2. El problema b) de la estadística surge de la inconsistencia de los enunciados a.1 y a.2 con el siguiente.

b.3 Las situaciones de medición, descritas por funciones de onda idénticas iniciales, a veces tienen resultados distintos y la probabilidad de cada posible resultado está dado (al menos aproximadamente) por la Regla de Born.

Esta inconsistencia también es conocida. Si la función de onda siempre evoluciona determinísticamente (a.2) entonces dos sistemas que inician con funciones de onda idénticas terminarán con funciones de onda idénticas. Pero si la función de onda es completa (a.1), los sistemas con funciones de onda idénticas serán idénticos en todo aspecto. En particular, no podrán contener detectores que indiquen resultados distintos. Esto en contra de b.3. De nuevo, las teorías de variables ocultas y no lineales pueden tener una solución a este problema. Las primeras al postular que la función de onda no representa completamente al sistema, los sistemas con funciones de onda idénticas podrán obtener resultados distintos dependiendo de sus variables adicionales. Las segundas, dado que la evolución no es determinista, aún cuando inicien con funciones de onda idénticas, no necesariamente terminarán en los mismos resultados.

¹Each of these options carries with it an obligation, the discharging of which demands the postulation of new physics. The measurement problem is sometimes portrayed as merely philosophical, or of no interest to physics proper. This is quite untrue.

La complicación está en querer negar b.3 el cual para Maudlin es querer negar el corazón empírico de la teoría. Las teorías de Muchos Mundos no tienen una explicación para las estadísticas de los resultados que nos presenta la regla de Born. Por último, el problema c) del efecto, Maudlin lo expresa como el hecho de que el colapso en la interpretación estándar nos da poder predictivo. La medición efectúa una modificación real del estado del sistema, conduciéndolo a un eigenestado del operador que representa la propiedad que se mide. Si nuestra nueva teoría no reproduce este efecto real que causan las mediciones habremos perdido este poder predictivo. Según Maudlin, teorías como la Mecánica de Bohm o GRW también salen bien librados de esta situación.

2.3.1. En búsqueda de teorías alternativas

Mucho se ha escrito con el propósito de dotar de mejores fundamentos a la mecánica cuántica, muchos artículos se han desarrollado en búsqueda de alternativas más satisfactorias que el formalismo estándar y muchas interpretaciones se han formulado con posturas en ocasiones totalmente polarizadas. Ya se han mencionado algunas como la mecánica de Bohm, el colapso objetivo de GRW y teorías de Muchos Mundos pero existen algunas más extravagantes como las que proponen los colapsos debido a la mente. Todas ellas han acertado en ciertos puntos de vista y han tenido objeciones en algunos otros. Esto nos ha inclinado a dudar más que nunca sobre el significado mismo de las teorías científicas o las metas principales del físico; si debemos preocuparnos o no por esta clase de dificultades. Lo que podemos asegurar es que en nuestra profesión en general tenemos la motivación en mayor o menor medida de comprender el mundo sin limitarnos sólo describir lo que sucede en un laboratorio, pero aún antes de ese anhelo filosófico: necesitamos que nuestras teorías describan el mundo sin depender del humor del físico que lo estudia. Es decir, nos gustaría teorías que al menos describan sin ambigüedades los experimentos de laboratorio. En este caso para el mundo cuántico nos gustaría una teoría que cumpliera con lo siguiente:

1. Los conceptos usados en su construcción deberán de aplicarse a los sistemas cuánticos sin dar lugar a ambigüedades que *dependan del humor del físico que las estudia*.
2. Deberá reproducir lo que vemos en los experimentos, con resultados definidos y estadísticas al menos aproximadas a las que nos da la regla de Born. Sin permitir la existencia de objetos abstractos faltos de interpretación física (e.g. gatos de Schrödinger) para experimentos reales.

Mecánica Cuántica Relacional

Estudia la ciencia del arte

Estudia el arte de la ciencia

Desarrolla tus sentidos, especialmente

Aprende a observar

*Comprende que todo se relaciona con
todo lo demás*

Leonardo Da Vinci

A continuación se presentará una propuesta relativamente nueva (1994) para interpretar el formalismo estándar de la mecánica cuántica y para resolver el problema de la medición, presentados en el capítulo anterior. Esta propuesta es la mecánica cuántica relacional de Carlo Rovelli cuya idea central es la no existencia de estados absolutos de un sistema (cualquiera) o independientes de un observador.

La motivación del trabajo del autor dice ser: “la observación común de que a pesar del lapso de 70 años desde el descubrimiento de la mecánica cuántica y la variedad de intentos de clarificar su contenido... aún mantiene un nivel notable de obscuridad... el aspecto problemático de la teoría asume diferentes caras para distintas interpretaciones” y “el hecho de que ninguna interpretación hasta ahora ha logrado convencer a la mayoría de los físicos”. Para Rovelli el problema no reside en remplazar a la teoría o en arreglarla, más bien reside en entender precisamente lo que ésta nos dice sobre el mundo. [13]

3.1. Reformulación del problema de interpretación de la mecánica cuántica

La mayoría de las propuestas existentes exploran la idea de que el formalismo estándar de la mecánica cuántica (MC) no refleja realmente al mundo, por esta razón se ha probado suponer que la función de onda no contiene todo lo necesario para describir al sistema o que la evolución de los estados no sigue la ecuación de Schrödinger, sin embargo Rovelli explora una idea distinta. Para él la MC *sintetiza la mayoría de lo que hemos aprendido hasta ahora sobre el mundo físico* y por tanto su propósito *no es modificar la MC para hacerla consistente con nuestra visión del mundo sino modificar nuestra visión del mundo para hacerla consistente con la MC* ¹.

Dicho lo anterior, si la tarea es en realidad cambiar nuestra visión del mundo para dejar de tener problemas con la MC será necesario cambiar alguna de nuestras nociones que probablemente se considere intocable pero resulte ser inapropiada para describir el mundo a nivel cuántico.

Como sucedió con la Relatividad Especial (RE), Rovelli piensa que la teoría dejará de ser confusa únicamente cuando seamos capaces de derivar el formalismo actual a partir de postulados simples con un claro contenido físico. En lugar de sólo buscar etiquetarle una interpretación al formalismo (sin modificar la teoría) como se ha hecho hasta ahora según Rovelli. Haciendo una muy breve recapitulación histórica de la construcción de la relatividad especial se puede decir lo siguiente: Las transformaciones de Lorentz, que en cierto modo son el corazón del formalismo de la teoría, ya existían y eran consideradas como inaceptables o inconsistentes y la interpretación que Lorentz les intentó etiquetar no fue nada atractiva o convincente hasta que Einstein logró derivarlas a partir de afirmar dos postulados de estricto carácter físico y exhibir una idea errónea que se tenía sobre el mundo: la noción de tiempo absoluto y la consecuente simultaneidad de dos eventos independientemente del observador. La inconformidad con las transformaciones de Lorentz se debía a *un esquema conceptual en el que una noción incorrecta -simultaneidad absoluta- era asumida, produciendo cualquier tipo de consecuencias paradójicas. Una vez que fue removida esta noción la interpretación física de las transformaciones de Lorentz quedó clara* ².

¹My effort here is not to modify quantum mechanics to make it consistent with my view of the world, but to modify my view of the world to make it consistent with quantum mechanics.

²The unease with the Lorentz transformations derived from a conceptual scheme in which an incorrect notion –absolute simultaneity– was assumed, yielding any sort of paradoxical consequences. Once this notion was removed the physical interpretation of the Lorentz transformations stood clear, and special relativity is now considered rather uncontroversial.

Análogamente Rovelli considera que todas las situaciones paradójicas asociadas a la MC (como el Gato de Schrödinger) son debido a una noción incorrecta que usamos al pensar en sistemas cuánticos y no en usar el formalismo cuántico ya que está claro el éxito experimental de la teoría. En resumen Rovelli tiene una sugerencia metodológica para el problema de la interpretación de la MC que describe como sigue:

- Encontrar un conjunto de aseveraciones (postulados) sobre el mundo con un claro significado físico que se conozcan como verdades experimentales;
- Analizarlas y mostrar que de su conjunción, algunas ideas comunes sobre el mundo son incorrectas;
- Derivar el formalismo completo de la mecánica cuántica a partir de estos postulados.

Si este programa puede llevarse a cabo satisfactoriamente, nos dice que entonces podremos empezar a decir con seguridad que hemos entendido la MC.

Rovelli considera que el problema de la teoría, el causante general de todas las inconformidades sobre ella, es al que se ha llamado **el problema de la medición**. Por lo que la noción incorrecta que buscamos deberá estar relacionada con este problema y asegura que en su propuesta hay una manera consistente de escapar a él.

3.2. La mecánica cuántica es una teoría sobre información

En esta sección se expone lo que Rovelli considera que es el problema de la medición y se introducen formalmente las ideas principales de su propuesta. Para ello asume el formalismo e interpretación estándar de la MC [5]. Pretende usar la teoría de la información como estructura para reformular la mecánica cuántica. Usando el concepto de información en el mismo sentido que Shannon (dice Rovelli): *La información es una medida del número de estados en los que puede estar un sistema o un conjunto de sistemas (cuyos estados de cada sistema se encuentran constreñidos físicamente)*.

3.2.1. El problema de la medición según Rovelli

A continuación se expone, tal y como lo hace Rovelli en su artículo, el proceso de medición descrito por medio del formalismo estándar con un ejemplo en particular que puede llevarnos a descripciones distintas y por tanto suscitar inconformidades con el uso de dicho formalismo.

3. MECÁNICA CUÁNTICA RELACIONAL

Considérese un observador O que hace mediciones sobre un sistema S , las cuáles se diferencian digamos por una manecilla. Asíumase que la cantidad medida q , puede tomar los valores 1 y 2 y los estados físicos del sistema S se describirán por vectores en el espacio de Hilbert H_s . Sean $|1\rangle$ y $|2\rangle$ los dos eigenestados del operador correspondiente a la medición de q . Sabemos que si S está en un estado normalizado común; puede representarse por $|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle$, donde α y β son números complejos que cumplen que $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, entonces O puede medir 1 ó 2 (su manecilla apuntará al número “1” o al “2”) con probabilidad $|\alpha|^2$ o $|\beta|^2$ respectivamente.

Si en un experimento ε , O mide 1. El sistema S es afectado por la medición y al tiempo $t = t_2$ después de la medición el estado del sistema (colapsará) será $|1\rangle$. Entonces O describe la secuencia de eventos como

$$\begin{aligned} & t_1 \rightarrow t_2 \\ & \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle \rightarrow |1\rangle. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ahora consideremos la misma secuencia de eventos en ε descrita por un segundo observador P que describe la interacción entre S y O . P no realiza ninguna medición en el sistema $S - O$ durante el intervalo de tiempo de t_1 a t_2 , pero conoce los estados iniciales de S y O . P describirá al sistema S mediante el espacio de Hilbert H_s y al sistema O mediante H_o por lo que el sistema conjunto estará descrito por el producto tensorial H_{so} entre ambos espacios. Sea $|On\rangle$ el vector de estado de O en t_1 (la manecilla de O apunta a la palabra “On”). Si el estado inicial de S es $|1\rangle$ (o $|2\rangle$) entonces $|On\rangle$ evoluciona al estado denotado por $|O1\rangle$ (u $|O2\rangle$) al tiempo t_2 después de la medición. Cuando el estado inicial de S es $|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle$, el estado inicial del sistema conjunto será $|\psi\rangle \otimes |On\rangle = (\alpha|1\rangle + \beta|2\rangle) \otimes |On\rangle$. Por lo que la linealidad de la mecánica cuántica nos indica que la secuencia de eventos en ε estará descrita por P como

$$\begin{aligned} & t_1 \rightarrow t_2 \\ & (\alpha|1\rangle + \beta|2\rangle) \otimes |On\rangle \rightarrow \alpha|1\rangle \otimes |O1\rangle + \beta|2\rangle \otimes |O2\rangle. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Para describir una secuencia de eventos mediante la mecánica cuántica estándar se requiere distinguir al sistema del observador pero la teoría nos da la libertad de pintar la línea entre los dos donde queramos y en el análisis anterior se hizo uso de esta libertad, considerando que P no interactúa con el sistema $S - O$ por lo que no lo modifica. Por lo tanto podemos decir que para describir ε se obtuvieron dos descripciones distintas de la misma secuencia de eventos y esto es permitido por la MC, lo cual causa serias inconformidades conceptuales como ya se expuso con más detalle en el capítulo anterior.

La propuesta de Rovelli para evadir o solventar estas inconformidades es no considerar que esto es un problema, por el contrario asegura que las dos descripciones son correctas (ya que la MC ha resultado muy útil para describir el mundo) y de aquí surge su observación principal (OP). Recordemos que su motivación es modificar su visión del mundo en lugar de modificar nuestra teoría.

Observación Principal: En mecánica cuántica, diferentes observadores darán una descripción distinta de la misma secuencia de eventos.

Asegurar que la MC describe acertadamente al mundo y por tanto la observación anterior es correcta y tomando en cuenta que las descripciones que todos los observadores dan es siempre sobre los estados de otros sistemas lleva a Rovelli a concluir que no existe la noción de estado absoluto de un sistema. Pero esto ya es algo nuevo; en física siempre consideramos que aunque existen propiedades relativas, también existen algunas otras propiedades más fundamentales que son independientes del observador y el conjunto de estas propiedades absolutas son las que caracterizan al estado de nuestro sistema en un cierto instante y así es como definimos normalmente el estado real de un sistema (a partir de sus propiedades intrínsecas y absolutas).

Si aceptamos la idea central a la que acabamos de llegar, nuestra visión del mundo debe cambiar totalmente y Rovelli nos intentará convencer de que la noción errónea que desenmascaró aceptar OP, la de estados independientes del observador, es la causante de todo el malestar que produce la MC. Por lo que primero será importante para él, refutar una serie de posibles objeciones que se pueden decir sobre su OP.

3.2.2. Objeciones contra la Observación Principal

Objeción 1. Sea que la descripción (3.1) o la descripción (3.2) es la correcta depende de qué tipo de sistema es O . Hay sistemas que inducen el colapso de la función de onda. Por ejemplo si O es macroscópico (3.1) es correcta pero si O es microscópico (3.2) es la correcta.¹ Rovelli nos responde que la derivación de (3.2) no ocupó alguna suposición sobre el sistema mas allá de que la MC pudiera ser aplicada en él. Por lo que un sistema O produciendo (3.1) en lugar de (3.2) a través de la evolución de Schrödinger deberá comportarse en contradicción con el formalismo de la MC. Esto implicaría que O no puede ser descrito como un sistema cuántico genuino. i.e. existen sistemas que no obedecen la MC convencional y producen el colapso de las funciones de onda. Si aceptamos esta idea se tiene que separar la realidad en sistemas: mecánico-cuánticos por un lado y especiales (clásicos) por otro. Esto es una complicación con la que Rovelli no desea lidiar y prefiere asumir como verdadera la siguiente hipótesis.

Hip.1: Todos los sistemas son equivalentes, nada distingue a priori sistemas macroscópicos de cuánticos. Si el observador O puede dar una descripción cuántica de S , entonces también P podrá dar una descripción cuántica del sistema formado por O y S .²

¹Los enunciados originales de las objeciones 1 a 8 se encuentran en el apéndice A.1 para evitarnos usar tanto espacio aquí.

²All systems are equivalent: Nothing distinguishes a priori macroscopic systems from quantum systems. If the observer O can give a quantum description of the system S , then it is also legitimate for an observer P to give a quantum description of the system formed by the observer O .

La motivación para asumir como verdadera la hipótesis anterior radica en la motivación inicial, -cambiar tu visión del mundo en lugar de cambiar a la MC-. Si existieran sistemas especiales sólo recorreríamos el problema a explicar cuáles son estos sistemas especiales y cómo o en qué momento causan el rompimiento de la evolución lineal descrita por Schrödinger, y tendríamos que explicar nueva física. Así que Rovelli prefiere simplemente ajustarnos a la idea de que todos los sistemas son equivalentes y todos pueden describir legítimamente el estado de otros sistemas de modo que no sea necesario explicar física nueva.

Objeción 2. Lo que la discusión indica es que el estado cuántico es diferente en las dos descripciones pero el estado cuántico es una construcción mental ficticia y no física; el contenido físico de la teoría lo dan los resultados de las mediciones. Nada nos detiene a tomar este punto de vista pero se argumenta que aún así llegaremos a la OP ya que, la descripción (3.2) muestra que no hay nada que decir del valor de la cantidad q de S al tiempo t_2 : para P , en $t = t_2$ la cantidad q no tiene un valor bien definido. Por otra parte, para O , al tiempo $t = t_2$, q tiene el valor 1. Y de nuevo se tienen visiones distintas para distintos observadores.

Objeción 3. Como antes (únicamente los resultados de las mediciones son físicos), pero la verdad del caso es que P está bien y O está mal. Para el autor, esta postura es indefendible ya que todos los experimentos físicos de los que sabemos pueden verse como instancias de la medición en $S - O$ y esto implicaría que ningún resultado de cualquier medición se ha obtenido aún y se pregunta “Si es así, ¿Cómo podríamos haber aprendido teoría cuántica?”

Las posibles objeciones restantes (de la 4 a la 8) se encontrarán en el Apéndice B.

3.2.3. Discusión Central

Como ya se mencionó, aceptar la OP nos lleva a que cada descripción dada por la MC necesariamente debe relacionarse con un sistema observador. Ahora se caracterizarán a los estados de los sistemas estudiados por los valores de sus propiedades relativas a otro observador en particular. Y así toda cantidad física (el valor de alguna propiedad de un sistema) también dependerá del observador en cuestión. Pero por la Hip.1 recordemos que todos los sistemas son equivalentes, todos pueden dar sus descripciones. Los observadores podrán ser cualquier sistema y en conclusión diremos que:

*La mecánica cuántica es la teoría sobre los estados de los sistemas y los valores de las cantidades físicas relativos a otros sistemas.*¹

¹Quantum mechanics can therefore be viewed as a theory about the states of systems and values of physical quantities relative to other systems.

Según esto cualquier sistema puede dar una descripción legítima sobre otro, pero Rovelli además especifica que para que una descripción exista es necesario que el sistema observador haya *interactuado físicamente* con el sistema observado (después lo detallará un poco mejor en términos de la información).

Ahora bien, si la mecánica cuántica únicamente está compuesta por descripciones relativas, se podría pensar la posibilidad de que exista una teoría más fundamental que logre describir lo que pasa “en la realidad”. Pero Rovelli nos dice que esto es lo mismo que decir que la MC es incompleta en el sentido de que no refleja enteramente el mundo y que el fondo de esta idea es más filosófica: “Dado que la realidad debe ser real y universal, e igual para todos, una teoría en la que la descripción de la realidad es dependiente del observador, es ciertamente una teoría incompleta.” *Si una teoría así fuera completa, nuestro concepto de realidad quedaría perturbado*¹.

En contra de lo que sugiere esta idea, debido a su motivación, Rovelli prefiere perturbar su visión del mundo que a la teoría exitosa que nunca ha sido falseada experimentalmente. Así que en lugar de suponer a la MC incompleta enuncia una segunda hipótesis (Hip.2).

Hip.2: La Mecánica Cuántica provee un esquema completo y auto consistente para describir al mundo físico, apropiado a nuestro nivel actual para hacer observaciones experimentales.²

Si todos los estados y los valores (de las propiedades) son relativos al observador como en el caso de la velocidad en la RE, una descripción completa sobre el mundo es alcanzada por la información relevante que los sistemas tienen entre ellos, no hay tal cosa como el estado absoluto de un sistema o como los valores reales e independientes del observador (para alguna propiedad de un sistema). Las descripciones (3.1) y (3.2) son igualmente válidas e igualmente correctas, más aún cada una es una imagen completa, no hay información faltante para ningún observador al usar la MC, la descripción que cada uno da refleja completa y certeramente lo que puede decirse sobre el mundo. Así podemos decir que **“La física es completamente relacional”**.

Todas las ideas hasta ahora presentadas pueden resumirse en lo que llamaremos la tesis central (TC) de la propuesta de Rovelli:

¹“Since reality has to be real and universal, and the same for everybody, then a theory in which the description of reality is observer-dependent is certainly an incomplete theory”. If such a theory were complete, our concept of reality would be disturbed. Rovelli pone esto como una objeción en su contra.

²Quantum mechanics provides a complete and self-consistent scheme of description of the physical world, appropriate to our present level of experimental observations.

3. MECÁNICA CUÁNTICA RELACIONAL

Tesis Central: *La mecánica cuántica es la teoría sobre la descripción física de sistemas físicos relativa a otros sistemas, y esta es una descripción completa sobre el mundo.*¹

Esto nos conduce a que todos los enunciados que hacemos sobre el mundo físico conllevan una etiqueta para el sistema que efectúa la observación. Por ejemplo: el spin del electrón apunta hacia arriba *con respecto al aparato Stern Gerlach que lo mide*, la posición del tren es tal o cual *con respecto al sistema de referencia que lo observa* (o esta tesis es buena *con respecto a quien la lea*).

3.2.4. Relación entre descripciones y el proceso de medición

Conocemos ya la esencia conceptual de la propuesta que hace Rovelli en su trabajo, la cual se puede resumir en la Tesis Central. Pero esto no es todo lo necesario para hablar sobre una teoría que describa al mundo. Aún falta un ingrediente crucial que nos permita comparar lo que yo pueda decir sobre una porción del mundo con lo que alguien más pueda decir sobre esa misma porción. Este ingrediente es el que nos permite hacer ciencia. La interpretación de Rovelli contenida en la TC, bajo sus mismas palabras *induce una multiplicación de los puntos de vista* por lo que el siguiente problema será explicar cómo están relacionadas estas diferentes visiones, dicho de otro modo, tenemos que saber específicamente

¿Cuál es la relación entre las distintas descripciones cuánticas correctas que se pueden dar sobre una misma secuencia de eventos?

Si se piensa en una relación absoluta entre las descripciones, Rovelli argumenta que la pregunta es errónea ya que buscar una relación absoluta entre distintas descripciones es lo mismo que buscar un estado absoluto, por lo tanto no tiene sentido preguntarse por dicha relación absoluta. En particular dice que no hay manera de deducir la descripción que un observador da, desde la descripción que otro de. Pero aún así, sí es posible y tiene sentido hablar de la relación entre descripciones, pero tiene que ser entendida *cuánticamente*. Pues el proceso de comparar descripciones “siempre involucra una interacción física y todas las interacciones físicas son mecánico-cuánticas por naturaleza.”

Por ejemplo, la secuencia de eventos ε fue descrita de dos maneras distintas en la sección 3.2.1 así, nos podemos preguntar ¿Cuál es la relación entre el valor de una variable q relativa al observador O , y el valor de la misma variable relativa a un observador diferente? Si queremos saber cuál es la relación entre esas dos descripciones, debemos fijarnos en la visión de uno de los dos observadores o en la de un tercero. Ya que el que una cierta cantidad q tenga un valor (digamos 1) con respecto a O es un hecho

¹Quantum mechanics is a theory about the physical description of physical systems relative to other systems, and this is a complete description of the world.

físico y “como hecho físico, el que sea cierto o no, deberá ser entendido respecto a algún observador” en concordancia con todo lo dicho hasta la TC. Si estudiamos la visión de O , el sistema será S , pero si estudiamos la visión que P tiene sobre el valor q , el sistema será el conjunto $S - O$ y tendrá la propiedad física “el valor de q con respecto a O ” que relacionará el estado únicamente de S ($|1\rangle$), con el estado únicamente de O ($|O1\rangle$). Es importante volver a señalar que si queremos comparar distintas descripciones necesariamente tiene que haber una interacción física entre los observadores.

Y para Rovelli hay dos tipos de preguntas sobre la relación entre descripciones¹:

- (i) ¿El observador P sabrá que O conoce el valor de q ?
- (ii) ¿El observador P conoce el valor de q relativo a O ?

La pregunta (i) en otras palabras significa: “¿El sistema P sabrá que O ya midió el valor de q para S ?” Rovelli dice que sí gracias al formalismo de la MC. P sabrá que O sí conoce el valor de q . Ya que la descripción (3.2) de P muestra este hecho al relacionar los estados de modo que el sistema conjunto $S - O$ se encuentra en la superposición del estado ($|1\rangle \otimes |O1\rangle$) con el estado ($|2\rangle \otimes |O2\rangle$). El primero como ya sabemos, significa que S se encuentra en el estado $|1\rangle$ y O en el estado $|O1\rangle$; que implica que el observador O se encuentra marcando correctamente el valor $q = 1$ de S . Análogamente el segundo significa que S se encuentra en el estado $|2\rangle$ y O en el estado $|O2\rangle$, que marca correctamente el valor $q = 2$ de S . Podemos expresar lo anterior (y más) mediante el uso de un operador M que actúa sobre $S - O$ como sigue

$$\begin{aligned}
 M(|1\rangle \otimes |O1\rangle) &= |1\rangle \otimes |O1\rangle \\
 M(|1\rangle \otimes |O2\rangle) &= 0 \\
 M(|2\rangle \otimes |O2\rangle) &= |2\rangle \otimes |O2\rangle \\
 M(|2\rangle \otimes |O1\rangle) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Interpretamos físicamente al operador M como “¿Está correctamente correlacionado el estado de O (donde apunta su manecilla) con el estado de S ?” Y tendrá como respuesta: “sí” cuando P mida M y el sistema $S - O$ se encuentre en alguno de los eigenestados ($|1\rangle \otimes |O1\rangle$), ($|2\rangle \otimes |O2\rangle$) o alguna combinación lineal de estos como en (3.2). Recordemos que el estado $|O1\rangle$ (u $|O2\rangle$) del sistema O , se refiere a que su manecilla apunta al número uno (o dos) después de medir (interactuar con) el sistema S a t_2 . Es decir que O conoce el valor de q . Por ello, responder “sí” a la pregunta hecha al inicio de este párrafo también responde afirmativamente la pregunta (i) que especifica que el observador P sí sabe que O conoce (midió) el valor de q (Esto es, saber que los demás sí conocen la cantidad de su salario).

¹Ejemplifica la diferencia entre estas preguntas con la analogía: “Yo sé que tú sabes la cantidad de tu salario pero yo no sé el valor que tú conoces sobre esa cantidad.”

3. MECÁNICA CUÁNTICA RELACIONAL

Sin embargo afirmar esto no sirve en general para responder la pregunta (ii) (saber cuál es la cantidad de dinero que reciben como salario los demás), no podemos conocer cuál es el valor de q que O obtuvo sobre S ya que sólo en casos particulares en los que α o β se anulen es posible para P predecir el valor de q con certeza, pero esto no es así en el caso más general en que α y β no son nulos como en (3.2).

Aún nos falta algo que decir con respecto a la pregunta (i), ¿es posible responderla negativamente? Sí, en general el sistema $S - O$ no se encontrará en alguno de los eigenestados de M por lo que P no podrá saber si O ya conoce (midió) el valor de q . *En particular la interacción física entre S y O que establece una correlación tomará tiempo. Entonces la correlación entre la variable q de S y la manecilla de O se establecerá gradualmente.*¹ Esto se debe a que en algunos casos hablaremos de sistemas (macroscópicos) que se encuentran compuestos por muchos subsistemas (microscópicos) y dado que las correlaciones se dan por medio de interacciones físicas, cada subsistema tendrá que interactuar y en general estas interacciones no serán al mismo tiempo, se realizarán una después de la otra y por lo tanto la correlación entre los sistemas completos no se establecerá inmediatamente.

Ahora bien, esto no significa que la medición de O sobre S se haga gradualmente o lo que es lo mismo, que q tendrá valor con respecto a O sólo parcialmente, ya que la medición de O sobre S es un un hecho físico del sistema $S - O$ y por tanto debe ser referido a un observador P bajo las reglas de la MC, por lo que si P intenta saber el estado de la medición de O sobre S mediante el operador M , obtendrá como resultado que sí (eigenvalor 1) se realizó o que no (eigenvalor 0) con sus respectivas probabilidades.

*En otras palabras: No hay mediciones a medias; hay probabilidades de que la medición se haya o no se haya hecho. Nunca vemos superposiciones cuánticas de valores físicos, sólo vemos valores físicos, pero podemos predecir qué valor veremos sólo probabilísticamente. Análogamente, yo puedo decir sólo probabilísticamente si una variable física tiene o no un cierto valor para tí; pero no debo de decir que tu “medio ves” una cantidad física*². Y esta es la forma en la que Rovelli intenta dejar totalmente claro a qué nos referimos cuando hablamos del *proceso de medición*.

Antes de pasar por fin a la pregunta (ii) Rovelli hace una aclaración con respecto

¹In particular, the physical interaction between S and O which establishes the correlation will take time. Therefore the correlation between the q variable of S and the pointer variable of O will be established gradually.

²In other words: there is no half-a-measurement; there is probability one-half that the measurement has been made! We never see quantum superpositions of physical values, we only see physical values, but we can predict which one we are going to see only probabilistically. Similarly, I can say only probabilistically whether or not a physical quantity has taken value for you; but I should not say that you “half-see” a physical quantity!

al problema de las bases. Sabemos que el formalismo estándar nos permite elegir la base que más nos guste, no hay una preferencia sobre esto, entonces dado un estado arbitrario del sistema $S - O$, siempre habrá una base en cada uno de los dos espacios de Hilbert que nos permita definir un operador M para el cual el sistema $S - O$ se encuentre en un eigenestado. *Pero esto es de nulo sentido práctico o teórico. Estamos interesados únicamente en operadores auto-adjuntos que representen observables que sabemos cómo medir; por esta misma razón, estamos únicamente interesados en correlaciones entre ciertas cantidades: aquellas que sabemos medir*¹. Es decir, para Rovelli prácticamente no hay un problema de las bases.

Ahora, Rovelli también enuncia la pregunta (ii) como: ¿cuál es el resultado de la medición realizada por O ? Recordemos que ésta es una pregunta física que P se hace sobre el sistema conjunto $S - O$ y si la quiere responder en un tiempo t_3 posterior a t_2 deberá medir a (interactuar con) O para saber si se encuentra en el estado ($|O1\rangle$) u ($|O2\rangle$) pero hay una condición de consistencia (CC) que debe ser cumplida; si P sabe que O ha medido q , luego P mide q y luego mide el resultado que O ha obtenido al medir q (es decir que P observa a dónde apunta la manecilla de O), la consistencia requiere que los resultados obtenidos por P sobre q estén *bien* correlacionados con los resultados que obtuvo sobre O .

Y observando la ecuación (3.2) es claro que lo están. Ya que un observador externo que no conozca el resultado de las mediciones siempre podrá decir que, a un tiempo finito t_2 , la situación es del tipo (3.2). Así, tenemos una condición de consistencia que se satisface entre las distintas descripciones relativas.

Condición de Consistencia: *El hecho de que una variable de O tenga información sobre S (haya medido q) es expresado por la existencia de una correlación entre la variable q de S y la variable apuntadora (manecilla) de O . La existencia de esta correlación es una propiedad medible del sistema $S - O$.*

Pero tengamos en cuenta que esta CC no es algo que se imponga, ya se cumplía desde que se supone cierta y completa la MC estándar.

3.2.5. Información

Ahora, ¿a qué nos hemos referido en todo lo que se ha dicho hasta ahora cuando decimos que “una propiedad q del sistema S tomó el valor $q = 1$ (ó 2) con respecto a O (o a P u otro observador)? Esto es, la relación que hay entre la manecilla del observador O y el sistema S será la *información teórica*.

¹But this is of null practical nor theoretical significance. We are interested in certain self-adjoint operators only, representing observables that we know how to measure; for this same reason, we are only interested in correlations between certain quantities: the ones we know how to measure.

3. MECÁNICA CUÁNTICA RELACIONAL

Correlación es “información” en el sentido de teoría de la información. Es equivalente decir que q tiene un cierto valor con respecto de O que decir: O tiene la información de que $q = 1$.¹ El problema de definir técnicamente la información fue resuelto por Shannon, y Rovelli lo expresa como sigue:

La cantidad de información es el número de elementos de un conjunto de alternativas de las cuales una configuración es escogida. La información expresa el hecho de que un sistema se encuentra en una cierta configuración, que está correlacionada a la configuración de otro sistema (fuente de información).

Para Rovelli, en una teoría física podemos considerar la noción más básica de información y tendremos un panorama muy general en el cual no es necesario considerar almacenamiento de información, termodinámica, o algo parecido. En particular:

- *La información puede perderse dinámicamente (un estado co-relacionado puede volverse no co-relacionado)*
- *No se distingue entre co-relación obtenida a propósito y co-relación accidental*
- *Cualquier sistema físico puede contener información sobre otro sistema físico.*

En este último punto tal vez sea necesario aclarar que lo interesante no es que algún sistema físico pueda contener información sobre alguno otro, lo interesante es decir que cualquier sistema podrá hacerlo, Rovelli requiere esto para ir de acuerdo a Hip.1.

*Si hay alguna posibilidad de lograr entender como un sistema puede comportarse como observador sin renunciar al postulado de que todos los sistemas son equivalentes, entonces el mismo tipo de proceso (“colapso”) que ocurre entre un electrón y un aparato macroscópico, deberá suceder entre dos electrones. Ya que los observadores no son sistemas físicos especiales en ningún sentido.*²

Además todo lo que se ha dicho sobre los sistemas físicos hasta ahora se ha hecho bajo una suposición que no nos hemos detenido a mencionar claramente. Esta es que podemos descomponer el mundo en una colección de sistemas físicos (de distintas

¹Claramente la noción que usa Rovelli no tendrá que ver con observadores humanos, o sistemas que entiendan.

²If there is any hope of understanding how a system may behave as observer without renouncing the postulate that all systems are equivalent, then the same kind of processes –“collapse”– that happens between an electron and a CERN machine, may also happen between an electron and another electron. Observers are not “physically special systems” in any sense. (Esta cita se tradujo con algunas modificaciones para clarificar la idea)

maneras) pero cumplan con las mismas reglas (las de la MC) al interactuar. Pareciera que esto es casi una suposición obvia, pero si queremos despejarnos de toda duda sobre la mecánica cuántica tenemos que ser totalmente transparentes. Ya que así como en biología no todo objeto cumple con ser un sistema vivo que crezca, metabolice, se reproduzca y evolucione según Darwin [14], en física podría ser que no todo objeto cumpla con ser un sistema físico que siga las reglas de la MC. Pero por la motivación de Rovelli, en particular su Hip.1, supondremos que así es el mundo y nos permite separarlo de esa manera. Dado que también supone que la MC es una teoría completa para describir al mundo (Hip.2) entonces igualmente podremos decir que un sistema físico será definido como todo aquel que cumpla con las reglas de la MC.

Entonces si pensamos en la tesis de Rovelli en términos de la información teórica llegamos a que la información que P posee sobre el sistema $S - O$ es propabilística en el sentido de que le sirve para responder afirmativamente la pregunta (i) (sabrá que O sí conoce el valor de Q) pero no para responder la pregunta (ii) (no sabrá el valor de q relativo a O), sólo contiene información sobre la probabilidad de obtener uno u otro valor. Y también podemos ver que usar este concepto en la tesis de Rovelli, sólo nos *dezlaza un paso del problema*, ya que al final la información que O posee la explicaremos en términos de la información que P posee (y así sucesivamente).

Ahora podemos reescribir los enunciados físicos como: El aparato Stern-Gerlach *tiene información de que* el espín del electrón apunta hacia arriba o tal observador *contiene la información de que* el vagón del tren se encuentra en alguna posición (o mi mente *tiene la información de que* esta tesis fue buena), pero tenemos que tomar en cuenta que esta información es relativa y queda abierta la posibilidad de que algún otro observador contenga otra información, que el espín del electrón apunta en otra dirección, que la posición del tren es otra (o que esta tesis no fue buena).

Vemos que al incluir formalmente el concepto de información según Rovelli, conservamos las hipótesis impuestas por él y la multiplicación de los puntos de vista, en conclusión podemos también reescribir la tesis central como sigue

Tesis central: La Mecánica cuántica es la teoría de la información(teórica) relativa que los sistemas tienen entre(sobre) ellos y esta información contiene todo lo que podemos decir científicamente acerca el mundo.

Rovelli va un paso más allá y dice que es toda la ciencia física, no sólo la MC, que se puede tratar en términos de la información. En la siguiente sección se hablará sobre el esquema de reconstrucción de la MC a partir de todo lo dicho hasta ahora.

3.3. Reconstrucción de la Mecánica Cuántica

3.3.1. Conceptos Básicos

En esta sección se presentarán los dos postulados a partir de los cuáles según Rovelli ha de ser posible reconstuir la mayor parte del formalismo actual de la mecánica cuántica. Estos postulados habrán de tener un claro contenido físico basado en la experiencia y estarán expresados en términos de la información.

Rovelli nos dice que la información, aquel concepto matemático en el que está centralmente basada su interpretación, se adquiere sólo mediante interacciones físicas. Para Rovelli el proceso preciso por el cuál la información es adquirida es irrelevante para los fines de esta discusión. Lo que importará es que la información física se considerará como una cantidad discreta de tal forma que existirá una cantidad mínima de información intercambiable entre sistemas y se denotará al proceso de adquisición de información (una medición) como una “pregunta” que un sistema (observador O) le hace a otro sistema (observado S). Ya que la información es discreta, cualquier proceso de adquisición de información, puede ser descompuesto en adquisiciones elementales de esta, llamados bits. La pregunta elemental que puede hacer un sistema (O) sobre otro (S) y que colecta un único bit de información será una pregunta de “Si/No”, y denotaremos a cada una de estas posibles preguntas como Q_1, Q_2, \dots

Cualquier sistema S , visto como el sistema observado, estará caracterizado por la familia de preguntas “Si/No” que puede preguntarle un cierto observador. Estas corresponderán a las variables físicas ya conocidas de mecánica clásica y a las observables de mecánica cuántica. El conjunto de estas preguntas se denotará por $W(S) = \{Q_i, i \in I\}$, donde el índice i pertenece al conjunto I característico de S . El resultado de una secuencia de preguntas (Q_1, Q_2, Q_3, \dots) se representará por una cadena

$$(e_1, e_2, e_3, \dots) \tag{3.4}$$

donde e_i será 0 ó 1 (un sí o no) y representara la respuesta del sistema a la pregunta Q_i . Entonces la información que O tiene sobre S puede ser representada como una cadena binaria. Además para Rovelli es “un hecho básico sobre la naturaleza que el conocimiento de una porción (e_1, \dots, e_n) de la cadena (3.4) nos provee de indicaciones sobre los resultados subsecuentes (e_{n+1}, e_{n+2}, \dots)”. Es en este sentido en que una cadena contiene la información que O tiene sobre S .

Repetir la misma pregunta (mismo experimento) y obtener siempre el mismo resultado no incrementara la información que O tiene sobre S . Existe una cierta cantidad de *información relevante* que un sistema tiene sobre otro y es definida como el contenido no trivial de la cadena, esto es la parte de (3.4) relevante para predecir futuras respuestas a futuras preguntas. La información relevante es el subconjunto de (3.4), obtenido

al descartar las e'_i s que no afectan los resultados de futuras preguntas.

En resumen tenemos el siguiente paralelismo:

- Una pregunta en el contexto de la información \rightarrow es una medición en el contexto estándar de la mecánica cuántica
- Estas mediciones se reducen a preguntas “si/no” \rightarrow que se representan por un operador de proyección sobre un subconjunto del espacio de Hilbert
- El conjunto de preguntas $W(S)$ que realiza $O \rightarrow$ corresponde al conjunto de observables
- La información que O contiene sobre $S \rightarrow$ será el estado de S (relativo a O).

Por simplicidad en lo que sigue de la exposición Rovelli tratará únicamente sistemas que su descripción cuántica esté dada por espacios finitos de Hilbert para omitir espectros continuos o problemas con los infinitos y menciona que la generalización no debe presentar mayor dificultad.

3.3.2. Los dos postulados principales

P1(información limitada): Hay una cantidad máxima de información relevante que puede ser extraída de un sistema.

P2(información ilimitada): Siempre es posible adquirir nueva información sobre un sistema.

La cantidad de información que O puede obtener sobre S es limitada por **P1**, esto nos permite conocer todo lo necesario sobre un sistema, dar una descripción completa sobre él a partir de una cantidad específica de información, un subconjunto finito de (3.4). Esto es una cadena

$$s = [e_1, \dots, e_N] \tag{3.5}$$

donde N , es un número que caracteriza al sistema S y representa el “conocimiento máximo” que O contiene sobre S . La cadena (3.5) representa a lo que anteriormente conocíamos como **estado del sistema**, la novedad según Rovelli no está en que el estado dependa de la respuesta del sistema observado a las preguntas (mediciones) que se le hagan, ya que eso lo conocíamos como procesos de preparación en el formalismo estándar de la MC, la novedad se encuentra en que el nuevo concepto de estado representado por (3.5) depende de las preguntas Q_1, \dots, Q_N que hace un cierto observador O , las cuales pueden ser distintas para otro observador P , en el sentido de que obtengan respuestas e'_1, \dots, e'_N distintas.

Ahora, si el observador O realiza una (o más) pregunta Q_{N+1} adicional a O , que las suficientes para determinar (3.5), habrán dos posibilidades; o la respuesta e_{N+1} está

3. MECÁNICA CUÁNTICA RELACIONAL

totalmente determinada por la cadena (3.5) o no lo está y por el postulado $P2$ el sistema O adquirirá nueva información sobre S . Pero esta nueva adquisición también está sujeta al postulado $P1$ por lo que se debe perder al menos un bit de información previa para mantener la cantidad máxima N . En palabras de Rovelli *cuando se adquiere nueva información, parte de la vieja información relevante se vuelve irrelevante*¹.

El segundo postulado además implica que la secuencia de mediciones que hagamos sobre un sistema no puede ser totalmente determinista, siempre habrá la posibilidad de obtener un resultado que no podíamos predecir con la información contenida por O sobre S aún cuando esta información fuera “completa”. Según Rovelli, este postulado está totalmente motivado por la observación experimental en sistemas cuanticos, para los cuales aún conociendo con exactitud su estado $|\psi\rangle$, podemos “aprender” algo nuevo sobre ellos midiendo una cantidad B tal que $|\psi\rangle$ no es un eigenestado de B .

Rovelli argumenta que de estos dos postulados con clara motivación empírica y que se han presentado en términos de la información surge casi en su totalidad el formalismo estándar de la MC y da un bosquejo de cómo lograrlo. Este programa aún no está completo pero para Rovelli sólo restan problemas técnicos por resolver y la física de esta nueva interpretación reside en todo lo dicho hasta ahora. Para los fines de este trabajo será suficiente con analizar lo que se ha dicho, para saber si la interpretación es satisfactoria o al menos presenta ventajas con respecto a las ya existentes.

3.3.3. El observador observado y el colapso de la función de onda

Ahora haremos unas últimas aclaraciones con respecto a la relación que hay entre las descripciones (la información) que dos observadores tienen sobre un mismo sistema. El hecho de que un sistema O tenga información sobre un sistema S es un hecho que se refiere al estado físico de O y dado que los estados dejan de ser independientes en esta interpretación, cualquier afirmación sobre O tendrá que ser referida a otro observador P . Por ejemplo, el observador P tuvo que interactuar inicialmente con el sistema $S - O$ para saber que están correlacionados y si P quiere obtener aún más información tendrá que volver a interactuar físicamente con el sistema $S - O$.

Si queremos comparar la visión de O con la visión de P sobre S , tendrán que interactuar físicamente los observadores entre ellos. En otras palabras la pregunta ¿Los observadores P y O tienen la misma información sobre un sistema S ? no tiene sentido alguno, ya que preguntar esto es preguntar por el estado absoluto de O y P . Lo que sí tendría sentido según Rovelli sería reformular la pregunta en términos de algún otro observador.

Por último, si P conoce la dinámica del sistema $S - O$, conocerá el hamiltoniano de O , de S y el hamiltoniano de interacción entre O y S el cuál no se desvanecerá porque

¹When new information is acquired, part of the old relevant-information becomes irrelevant.

la medición de O sobre S implica una interacción y entonces desde el punto de vista de P la medición entre O y S será una evolución tipo Schrödinger determinada por el hamiltoniano de interacción. Por otro lado O da una descripción sólo de S por lo que sólo tiene a su disposición el hamiltoniano de S . Pero dado que entre el tiempo t_1 y t_2 la evolución de S se ve afectada por su interacción con O , la descripción de S como un sistema que evoluciona de manera lineal y determinista se acabará. Esto es **el colapso de la función de onda**, el cual según Rovelli no ocurre debido a *misteriosos saltos cuánticos, o por efectos desconocidos, simplemente porque O no está dando una descripción completa de la interacción de S con él mismo, porque la información es correlación y no tiene sentido la correlación con uno mismo*¹.

3.4. Crítica al concepto de estado

Para finalizar esta sección presentaremos una última idea que va un poco más allá de la mecánica cuántica. Recordemos que con esta interpretación nos vemos forzados a aceptar que no hay una propiedad objetiva de un sistema o alguna que esté definida de manera más precisa que la relacional. Las propiedades de los sistemas tendrán que describirse por medio de la concatenación de observaciones y la información que se obtiene de ellas relativo a cada sistema observador.

Cualquier situación se puede describir completamente por un observador global, pero este observador global invocara a un observador aún más general para describirlo. Y si consideramos un observador interno al sistema, este sólo podrá dar una descripción probabilística de la situación. No hay una forma de escapar a esto.

Cualquier observación requiere de un observador.

Y como para Rovelli todo sistema físico al final es un sistema cuántico que seguirá estas reglas, su visión es una visión sobre toda la física y afirma que

La Mecánica Cuántica es la formalización teórica del descubrimiento experimental de que las descripciones que diferentes observadores dan sobre los mismos eventos, no son universales.

¹The unitary evolution does not break down for mysterious physical quantum jumps, or due to unknown effects, but simply because O is not giving a full dynamical description of the interaction. O cannot have a full description of the interaction of S with himself (O), because his information is correlation, and there is no meaning in being correlated with oneself.

Un mundo cuántico y... ¿Relacional?

Pareciera que la teoría es exclusivamente concerniente a los “resultados de medición” y no tiene nada que decir sobre nada más. ¿Cuando el “sistema” en cuestion es el mundo entero, donde encontramos al “medidor”? Adentro, en lugar de afuera, presumiblemente... Si la teoría aplica a cualquier cosa y no sólo a operaciones idealizadas de laboratorio, ¿no estamos obligados a admitir que más o menos procesos ‘como-mediciones’ ocurren más o menos todo el tiempo más o menos en todos lados? ¿Hay acaso entonces algún momento en que no haya saltos y la ecuación de Schrödinger aplique?¹- J. S. Bell.

Como se dijo en la sección 3.1, el modelo que construye Rovelli está motivado por el problema de la medición, al cuál bajo sus mismas palabras, expondrá y dará solución a través de una mecánica cuántica relacional. La única exposición que da de este problema es la variedad de las descripciones entre distintos observadores sobre una misma secuencia de eventos ejemplificado con (3.1) y (3.2), a esto le llamaremos el problema de la medición de Rovelli (PMR), pero esto no es en su totalidad el problema de la medición que surge del formalismo estándar, es sólo una instancia de él, por lo que si la propuesta de la MCR resuelve esta instancia del problema, aún faltaría comprobar que resuelve el problema más general. En este capítulo analizaremos y discutiremos la propuesta de Rovelli para interpretar la teoría cuántica.

¿Y qué es lo que Rovelli se perdió u omitió de dicho problema? Dos partes muy importantes que exponemos a continuación.

¹It would seem that the theory is exclusively concerned with ‘results of measurement’ and has nothing to say about anything else. When the ‘system’ in question is the whole world where is the ‘measurer’ to be found? Inside, rather than outside, presumably. If the theory is to apply to anything but idealized laboratory operations, are we not obliged to admit that more or less ‘measurement-like’ processes are going on more or less all the time more or less everywhere? Is there ever then a moment when there is no jumping and the Schrodinger equation applies?

4.1. Dos instancias del problema de la medición

→ **(A)** El problema de la medición se puede formular sin la necesidad de observadores distintos. Como se expuso en el capítulo 2, únicamente notamos que un mismo observador puede dar descripciones distintas del mismo experimento bajo las reglas de la MC, ya que el formalismo estándar no especifica lo que cuenta como medición y lo que no pero hace uso de este concepto para invocar el postulado del colapso. La teoría al describir la dinámica de un sistema cuántico, depende de un concepto tan general como la medición. El cuál cada quién puede interpretar de manera distinta. Si se quiere, en la MC estándar un fenómeno físico depende de un fenómeno mental; como puedo ser optimista y pensar que ya ocurrió una medición en un cierto experimento, puedo ser pesimista y pensar que lo que tengo no es más que un conjunto de sistemas cuánticos que siguen la ecuación de Schrödinger, por ridículo que esto suene, el formalismo estándar lo permite.

Así es claro que hay un problema grave si queremos tener una mecánica cuántica totalmente transparente. Rovelli ataca el “problema” de distintos observadores obteniendo descripciones diferentes. Pero usando la misma analogía que hace con la relatividad especial, parece sensato pensar que dos observadores diferentes describirán de manera distinta una misma secuencia de eventos ya que por definición las condiciones físicas de la “observación” también difieren (si no fuera así hablaríamos de un mismo observador).

Esto nos da la impresión de que aquí no hay nada por resolver; no tiene nada de raro pensar que un observador distinto verá las cosas de manera distinta, pero la propuesta de Rovelli no es tan simple. Lo que tenemos que estudiar es si la MCR al final logra también atacar el problema (A) de un mismo observador. Como veremos, estos problemas (PMR y A) no son ajenos y la propuesta de Rovelli sí tendrá algo que decir acerca del problema de un sólo observador. Que logre resolverlo o no será parte de la discusión.

→ Y **(B)** El problema de las bases es otra instancia de problema general que Rovelli omitió. Este muestra que el formalismo estándar no es capaz de decirnos qué vamos a medir aún si supiéramos qué es medir. Ya que nos permite descomponer los vectores de estado en la base del operador que queramos. No se le da más importancia a una base que a otra (ese dato corre por la cuenta del físico que use la teoría). Como en el problema (A), tenemos que agregar (pensar en) información (coloquial) ajena a la teoría para obtener resultados. De nuevo la teoría física *depende del humor (mental) del físico* que la estudia.

Este no es un problema menor, si tenemos el deseo de entender lo que la mecánica cuántica nos dice sobre el mundo, indudablemente necesitamos una teoría con una interpretación que nos permita evadir el problema de las bases. La razón es directa: Una teoría que no nos pueda decir qué cosa vamos a medir (a menos que le agreguemos datos ajenos que sólo conocemos en el laboratorio), es una teoría que no está describiendo al

mundo, está siendo únicamente un recetario. Un recetario que no nos dice que platillo obtendremos y tampoco explica su sabor, sólo funciona en cocinas con ciertos aparatos específicos y el producto final depende del Chef. Para este problema de las bases Rovelli también tiene algo textual que decirnos y lo recordaremos más adelante.

En lo que sigue se analizará la propuesta relacional y se discutirá si en verdad resuelve PMR, si resuelve los problemas (A) y (B) o si presenta dificultades nuevas.

Restringir la mecánica cuántica exclusivamente a operaciones insignificantes en el laboratorio es traicionar la gran empresa. Una formulación sería no excluir al gran mundo fuera del laboratorio.- J.S.Bell

4.2. Plausibilidad de los tres ingredientes

Rovelli tiene una motivación clara para cocinar su propuesta, -la teoría actual refleja más acerca del mundo de lo que sabemos, así que tenemos que ajustar nuestra visión del mundo a la teoría en lugar de ajustar la teoría a nuestra visión del mundo-. Esta motivación es directamente su razón para usar los tres principales ingredientes en la preparación de su receta que son la Observación Principal (**OP**), la Hipótesis 1 (**Hip.1**) y la Hipótesis 2 (**Hip.2**).

OP: En mecánica cuántica, diferentes observadores darán una descripción distinta de la misma secuencia de eventos.

Hip.1: Todos los sistemas son equivalentes, nada distingue a priori sistemas macroscópicos de cuánticos. Si el observador O puede dar una descripción cuántica de S , entonces también P podrá dar una descripción cuántica del sistema formado por O y S .

Hip.2: La Mecánica Cuántica provee un esquema completo y auto consistente para describir al mundo físico, apropiado a nuestro nivel actual para hacer observaciones experimentales.

Creemos que aunque por un lado la Hip.1 suena razonable y no hay evidencia contundente sobre lo contrario (que existan sistemas especiales que sigan reglas distintas), por otro lado no hay razones suficientes para asegurar que de hecho la OP e Hip.2 se cumplen, esto es que las distintas descripciones son igualmente válidas y que la MC es completa. Al imponer estos tres ingredientes el autor se asegura de que su propuesta sea auto consistente. No se puede objetar dentro de la misma teoría relacional que en realidad alguna de las dos descripciones (3.1) o (3.2) es la correcta y la otra es errónea, ya que se llegó a ellas por medio de la mecánica cuántica estándar, que se supone completa. Para objetar que en realidad una de las dos descripciones es correcta es necesario abandonar alguno de los ingredientes (Observación principal, Hipótesis 1 o 2).

4.2.1. El ingrediente principal

La OP por sí sola es sensata como ya se ha mencionado. Lo interesante reside en mezclarla con el tercer ingrediente (Hip.2) y obtener lo siguiente

OP + Hip.2 : Las diferentes descripciones que obtengan distintos observadores por medio de la mecánica cuántica serán igualmente válidas como descripciones completas sobre el mundo.

Esto ya se vuelve una suposición muy grande, tanto que no hay un argumento concreto para aceptarla, sólo podemos creerla o no y trabajar con el resultado de ello. Rovelli la acepta completamente y por ende tiene que trabajar toda una interpretación en términos de la información para explicarnos por qué la diversidad de descripciones no es una inconsistencia de la teoría, la inconsistencia es nuestra por creer que los sistemas tienen una cierta clase de estado absoluto e independiente del observador. Pero es igual de válido no aceptar este supuesto. En esta dirección encontramos las teorías de variables adicionales como de Broglie-Bohm: La descripción (3.2) es incompleta, le hacen falta ciertas variables que puedan conducir a un resultado definido como en el caso de (3.1). Entonces el formalismo de la mecánica Bohmiana tiene que explicar por qué llegamos a un resultado definido al agregar estas variables. Efectivamente lo logra, mediante una onda piloto que determina las posiciones de las partículas que funcionan como las variables adicionales y complementan la información que contiene la función de onda. Así, Bohm resuelve PMR y evade los problemas (A) y (B) al no necesitar hablar de mediciones/interacciones físicas y postular una base privilegiada (la de las posiciones). [3]

4.2.2. El ingrediente de la indiferencia entre sistemas

Con respecto a la Hip.1: No hay evidencia empírica codificada en términos científicos comprensibles que sugiera la existencia de sistemas especiales. Es probable que exista de hecho evidencia empírica de esta clase de sistemas pero no tenemos aún las teorías necesarias para entenderlo y concluirlo¹. Y como hasta ahora nada de lo que nos dicen nuestras teorías (con respecto a los experimentos que hacemos) muestra esta clase de sistemas, es preferible por practicidad suponer que no existen. Aún así hay propuestas que más allá de la practicidad quieren estudiar las consecuencias de que haya sistemas

¹Con esto nos referimos a que (por ejemplo) podría ser que la mente humana y las consecuencias físicas de sus ideas (como construir un acelerador de partículas, o decidir cuando ocurre una medición) sea de hecho evidencia empírica de la existencia de un sistema especial pero no tenemos una teoría sobre la mente que nos permita concluirlo. Y tampoco entendemos claramente el problema de la relación “mente-cuerpo”, cosa que sería útil si quisieramos afirmar con seguridad que la mente actúa como un sistema especial en el mundo de la física.

especiales. En esta dirección encontramos ideas como la mente como causante del colapso o la gravedad como causante del colapso. Una propuesta como la que incluye a la mente aparenta potencial de explicar las dos instancias (A y B) del problema de la medición que Rovelli omitió. Lo anterior se debe a que si efectivamente los colapsos fueran causados por la mente, tendríamos mejores razones para pensar que *distintos estados mentales están relacionados con distintos estados físicos*. Sin embargo una teoría de este tipo está lejos de ser plausible en la época actual dado que nuestro conocimiento sobre la mente está inimaginablemente más reducido que nuestro conocimiento del mundo físico.

4.2.3. El ingrediente de la mecánica cuántica como teoría completa

El argumento para mantener la Hip.2 no es más que un acto de fe del autor en que el formalismo estándar es una descripción completa de la realidad, que la dinámica de Schrödinger logra describir con exactitud la evolución temporal de los estados y que futuros experimentos no encontrarán nunca una discrepancia con las predicciones teóricas de este formalismo. Pero existen otros *actos de fe* que contrastan con el de Rovelli, por ejemplo: Es igualmente sencillo y totalmente válido (sin incurrir en alguna contradicción) suponer que la ecuación de Schrödinger no es la mejor descripción dinámica, la MC no da una descripción completa de la evolución de los estados.

En esta dirección encontramos la propuesta del colapso objetivo de GRW¹: Si el colapso es un fenómeno físico entonces podemos decir que la descripción (3.2) es incorrecta ya que omite un hecho físico real que (3.1) sí contiene. GRW entonces tendrá que trabajar un formalismo que describa de manera completa la evolución de los estados y esto lo hace modificando la ecuación de Schrödinger volviéndola no lineal y estocástica. Esta modificación tendrá que suprimir las superposiciones macroscópicas pero con un bajo impacto sobre objetos microscópicos. Así, GRW resuelve PMR y el problema (A) sin necesidad de perturbar nuestra noción de *realidad independiente del observador*. [2]

4.3. ¿Cómo se defiende Rovelli de (A) y (B)?

Como mencionamos anteriormente, pareciera que decir que distintos observadores darán descripciones diferentes de una misma secuencia de eventos, no es nada raro y menos teniendo en mente la relatividad especial. Lo raro se encuentra al aceptar eso y querer explicar cómo hacemos ciencia. Tenemos que poder comparar las descripciones de los observadores y encontrar *algo en común*, alguna clase de consistencia que no nos deje caer en una visión solipsista del mundo. Es aquí donde encontramos las dificultades.

¹La diferencia aquí es que el acto de fe en GRW tiene posibilidad de ser confirmado por la experimentación.

4. UN MUNDO CUÁNTICO Y... ¿RELACIONAL?

¿Y por qué no vemos esa dificultad en la relatividad especial? Eso se debe a que en esa teoría se relativizaron sólo algunas propiedades de los sistemas físicos, como su velocidad o la simultaneidad pero aún teníamos propiedades (algo en común) en las que distintos observadores podían coincidir al comparar sus descripciones. Siendo esto, para resolver PMR asumiendo la tesis central Rovelli tendrá que explicarnos la relación entre distintas descripciones, como vimos en la sección 3.2.4., sin caer en una visión solipsista. Más adelante discutiremos lo que hizo Rovelli ahí pero por ahora asumamos que su explicación fue buena y concentrémonos en usar toda la maquinaria posible dentro de la MCR para estudiar si Rovelli logra resolver (A) y (B).

→ Para resolver la instancia (A) del problema de la medición existen dos caminos claros y válidos: uno puede construir una propuesta que no necesite hablar de mediciones y cosas análogas y otro puede explicar ese proceso eliminando las posibles ambigüedades. Podemos tomar en cuenta como defensa de Rovelli que su propuesta relacional intenta clarificar el “proceso de medición”, especificar en qué momento ocurren los colapsos y explicar que estos no son un fenómeno físico. Recordemos que en su construcción los colapsos aparecen siempre que un sistema P intente describir a otro sistema que lo involucre a él mismo por medio de una *interacción física*. En sus propias palabras *se debe entender exactamente lo mismo por el proceso (“colapso”) que ocurre entre una máquina del CERN y un electrón que entre dos electrones únicamente*. Mientras logre llevar a cabo esta idea, habrá aparentemente logrado resolver (A) además de resolver PMR.

Sin embargo, creemos que la explicación de Rovelli no es satisfactoria. Es cierto que al analizar el proceso de medición de aparatos comunes conocidos en el laboratorio con un operador de medición M , la pregunta de “en qué momento” ocurre una medición pierde sentido. Pero aún nos resta decir qué es una medición. Para ello Rovelli primero quiere convencernos de interpretar la física como una teoría de información entre (sobre) los sistemas y que estos siempre pueden adquirir información nueva o perderla.

Es aquí donde volvemos a encontrar problemas, Rovelli nos dice que la adquisición de información es por medio de interacciones físicas y que un colapso ocurre cuando un sistema P tiene información sobre otro sistema que involucra una interacción con el mismo P , entonces tenemos que tener claro qué es una interacción física. Para la cuál lamentablemente Rovelli nos dice textualmente

La información se intercambia por medio de interacciones físicas. El proceso a través del cuál la información es recolectada y almacenada no es de interés particular aquí, pero puede ser descrito físicamente en cualquier caso específico¹.

¹Information is exchanged via physical interactions. The actual process through which information is collected and perhaps stored is not of particular interest here, but can be physically described in any specific instance.

Entonces nos preguntamos qué sucede si consideramos únicamente dos electrones, ¿Cuándo comienzan a interactuar físicamente entre ellos? ¿Han estado interactuado desde que inició el universo? ¿O qué tan cerca deben de estar para que interactúen? ¿No es esto acaso el mismo problema que teníamos con la medición? Dado que en cualquier experimento macroscópico nos podemos reducir a pensar en la *primer interacción física* más elemental entre dos partículas fundamentales pareciera que de nuevo tenemos una propuesta ambigua que recae en nuestro *entendimiento*. Por lo tanto, **Rovelli no resuelve el problema (A)**, sólo lo recorre un paso cambiando una palabra por otra, de la medición a la “interacción”.

—→ Ahora pensemos en el problema (B): Olvidémonos de la discusión anterior y supongamos que la MCR de hecho sí clarifica el “proceso de medición”. ¿Sin agregar información ajena a la MCR, la teoría nos dice qué mediremos? Rovelli nos platica únicamente lo siguiente: Sabemos que el formalismo estándar nos permite elegir la base que más nos guste, no hay una preferencia sobre esto, entonces dado un estado arbitrario del sistema $S - O$, siempre habrá una base en cada uno de los dos espacios de Hilbert que nos permita definir un operador M para el cuál el sistema $S - O$ se encuentre en un eigenestado. Pero para Rovelli -*esto es de nulo sentido práctico o teórico. Estamos interesados únicamente en operadores auto-adjuntos que representen observables que sabemos cómo medir; por esta misma razón, estamos únicamente interesados en correlaciones entre ciertas cantidades: aquellas que sabemos medir*¹.

Una vez más tenemos una teoría de la mecánica cuántica que depende de nuestro estado mental; del físico que realiza un experimento y sabe de antemano qué es lo que va a medir antes de realizar el experimento.² Sucede algo parecido con la propuesta de Historias Consistentes en donde tenemos una concatenación de descripciones del mundo igualmente válidas que dependen del marco/observador y no hay forma de saber usando la teoría, lo que mediremos [10]. Por lo tanto Rovelli **no resuelve el problema (B)**.

Algo curioso es que si los físicos que realizan los experimentos son considerados como los sistemas observadores, se cumple alguna clase de *mecánica cuántica relacional sobre la mente* en la que el científico que sabe qué medirá su aparato; describirá al sistema de cierta manera y el científico que no conoce el aparato describirá al sistema de otra manera. Diferentes observadores darán descripciones distintas. Esto sólo se puede pensar con sistemas que involucren a la mente ya que no podemos decir que un sistema físico P cualquiera (no consciente) “sabe” lo que miden los aparatos. Pero en este caso estaríamos violando la Hip.1 sobre la inexistencia de sistemas especiales.

¹La cita original se encuentra en la página 21

²Nos referimos a saber qué propiedad se medirá, no al resultado definido de ella.

4.3.1. ¿La relación entre descripciones en verdad es relativa?

Rovelli argumenta que la relación entre la descripción que distintos observadores dan sobre un mismo sistema, también será relativa, sólo tendrá sentido si dicha relación se explica referida a algún otro observador. Como se explicó en la sección 4.0.3, alguno de los dos observadores interactuará antes que el otro con el sistema que quieren describir, por lo que al intentar comparar sus resultados, habrá una consistencia entre ellos que se debe de cumplir, es decir que en un tiempo posterior al que transcurrió en el experimento, si el segundo observador, por ejemplo P , intenta conocer el estado de O y S por separado, tendrá que encontrar resultados consistentes: si O había encontrado por separado que el valor de la propiedad q de S era 1, el resultado de las mediciones futuras de P sobre $S - O$ tendrá que concordar con esto.

Siendo así, ¿cómo podemos asegurar que el valor de q estaba completamente descrito al mismo tiempo que dependía del observador cuando de todos modos P llegaría al mismo resultado que O en un tiempo posterior?

Hay una condición de consistencia (CC) que de hecho se cumple y Rovelli sí especifica y esta es: que la medición de P sobre O y sobre S llegará a resultados correlacionados. Es decir que si P encuentra que el valor de la propiedad q de S era 2, el resultado de una medición futura de P sobre O tendrá que encontrar que su manecilla marca al estado $|O2\rangle$. Lo anterior es sin pensar en cuál había sido el resultado que O encontró sobre S antes de las mediciones de P . La CC que Rovelli impone es una condición débil porque no la impone por separado, se cumple por sí sola al suponer que la MC es completa y todas las descripciones son válidas ya que así se obtuvo la descripción (3.2) en la que es claro que cuando P realice mediciones sus resultados estarán bien correlacionados cumpliendo con CC.

Sin embargo, creemos que una teoría de la mecánica cuántica debe cumplir con una CC más fuerte que la de Rovelli como lo explicamos más arriba. Debería de suceder que los resultados de un sistema P sobre un sistema $S - O$ concuerden con las mediciones hechas anteriormente por el sistema O sobre S .

Esto aparenta estar relacionado con los problemas (A) y (B) pero en particular con el *problema del efecto* de Maudlin (explicado en el capítulo 2). Ya que sin esta CC fuerte, la teoría no nos dice que resultado obtendrá P al realizar una medición sobre $S - O$ en el caso de (3.2). Sin esta CC fuerte nos vemos en la necesidad de que exista un físico con memoria que “conozca” lo que midió O , entonces el podrá saber el resultado de P antes de hacer la medición. Como el caso del problema de las bases, donde ocupamos de físicos que sepan lo que miden sus aparatos y usen ese conocimiento, no contenido en la teoría, para hacer predicciones. En el formalismo estándar de la MC, esta CC fuerte está contenida en el postulado del colapso según Maudlin.

4.3.2. Relatividad Especial y Mecánica Cuántica Relacional

“A menudo discutíamos sus nociones sobre la realidad objetiva. Recuerdo que durante una caminata, Einstein de pronto se detuvo, volteo hacia mi y me pregunto si yo realmente creía que la luna existe sólo cuando la miro.”- Abraham Pais [8]

Por último, hablaremos de las diferencias entre la RE y la MCR. Las teorías de Einstein y Rovelli respectivamente, fueron construidas relativizando ciertas propiedades físicas; volviéndolas dependientes del *sistema de referencia inercial* o del observador. Similarmente, las dos teorías supusieron la validez de las descripciones que ciertos sistemas pueden dar y la equivalencia entre ciertos sistemas. Entonces, si Rovelli intentó seguir el mismo camino que Einstein para construir una teoría consistente ¿Por qué nos gusta tanto la RE conceptualmente a diferencia de la MCR?

Porque Einstein no relativizó propiedades fundamentales, sino solo secundarias como su velocidad y en consecuencia su “posición” y “tiempo”. Propiedades como la masa se mantuvieron invariantes. Desde Galileo sabíamos que la velocidad no era una propiedad intrínseca al sistema. Sólo podemos conocer los cambios de posición espacial de un sistema con respecto a otro. No tenemos manera de saber si un objeto cambia de posición sin un sistema de referencia. Más aún, no tiene sentido preguntarnos sobre la posición absoluta de un sistema si no contamos con alguno de referencia, sea el éter o cualquier sistema físico. Einstein sólo supuso equivalentes a los sistemas que fueran inerciales y sólo eran igualmente válidas las descripciones que estos podían dar.

En cambio Rovelli relativiza todas las propiedades físicas, incluidas las intrínsecas a los sistemas como la masa, el espín o la carga. Rovelli nos dice que todos los sistemas son equivalentes, no sólo algunos (como los inerciales) y las descripciones de cualquier sistema son igualmente válidas. Pero ¿Qué sucede si todas las variables físicas son relacionales como en el caso de la MCR?

A lo único a lo que podemos aspirar decir sobre el mundo es una concatenación de descripciones dependientes del sistema observador. Sin la existencia de una estructura de fondo o algo que nos sea posible asociar con la *realidad* invariante de las observaciones. No hay manera de inferir la visión de un observador desde la de algún otro. Como el mismo Rovelli nos dice, nuestra noción de realidad debe quedar totalmente alterada si queremos aceptar su interpretación.

Por otro lado, en el caso de la RE, las propiedades invariantes son parte de lo que conocemos como la realidad física de fondo. Y la teoría se ha ajustado tan bien a los experimentos que la estructura geométrica que surge de ella nos hace pensar que describe al mundo como es, o al menos de una forma parecida. Y esta estructura es la que nos permite conocer la visión de un sistema desde la de otro a través de las transformaciones de Lorentz. [10]

Conclusiones

*I cannot define the real problem,
therefore I suspect there's no real
problem,
but I'm not sure
there's no real problem.^a*

^aNo puedo definir el problema real, por lo tanto sospecho que no hay un problema real, pero no estoy seguro de que no haya un problema real.

R. Feynman

La Mecánica Cuántica guarda una extrañeza indudable pero emocionante; por un lado es un recetario que permite describir con magnífica precisión los experimentos de laboratorio y pareciera que jamás encontraremos una discrepancia. Por otro lado la visión que por ahora nos aporta es inexplicable; no nos permite entender lo que nos está diciendo sobre cómo es el mundo, al menos no de manera precisa.

La Mecánica Cuántica Relacional de Rovelli es un intento por despejarnos de las dudas que ha generado el problema de la medición. Para esto, Rovelli primero se compromete a no modificar la teoría como han hecho la mayoría, sino a modificar nuestra visión. En este camino nos lleva a que la idea común de *el estado de un sistema* no cobra sentido si no contiene el apellido de un observador que lo describa. Si le tenemos paciencia a esta idea, nos encontramos con la necesidad de una explicación sobre cómo se relacionan las distintas descripciones sobre una misma secuencia de eventos. Ya que sin ella no podríamos reconciliar la propuesta con el hecho de que podemos hacer ciencia. Es aquí donde se vuelve impostergable una clarificación del *proceso de*

5. CONCLUSIONES

medición. Y es también aquí donde el camino parece empezar a alejarnos del destino. Nos encontramos con un paisaje igualmente confuso como el de la mecánica cuántica estándar, en la que es necesario *entender* lo que significa medir y *saber* qué es lo que vamos a medir, pero esta vez tiene otro nombre. Ahora es necesario entender lo que significa interactuar físicamente y saber qué pasará cuando los sistemas interactúen.

La diferencia es que esta vez nuestra visión del mundo es más extraña, *toda observación requiere de un observador*. Pero al menos logramos hablar en términos menos *macroscópicos*, ahora la discusión se centra en el *intercambio de información* en el sentido teórico. Esto ciertamente es más fundamental que hablar de mediciones y podría decirse que este es el acierto de Rovelli. Sin embargo, el problema de la medición sufre de lo mismo; se vuelve más fundamental.

Rovelli no consigue resolver el problema de un solo observador que llamamos (A), ni el problema de las bases (B). El primero sólo se ve recorrido de un término ambiguo, a otro término más fundamental pero igual de vago. Y el segundo es menospreciado por Rovelli; para saber qué mediremos tenemos que invocar a físicos que conozcan nuestros aparatos, pero estos físicos no se encuentran considerados dentro de esta propuesta relacional.

Quisieramos una teoría que nos diga qué *pensar sobre el mundo*. Pero la que ahora usamos más bien nos permite jugar con nuestra mente y con cómo vemos al mundo. Siempre invocando a un observador, a veces como un sistema especial y a veces como cualquier sistema físico indiferente a las reglas del formalismo. Es tan incomprendida esta parte de la física que a algunos les ha parecido sensato proponer que el ingrediente perdido es la mente del observador. Y también es sorprendente que a muchos otros no nos parece tan insensata la idea. La propuesta aquí estudiada no es capaz de liberarse de esta vaga noción y termina igualmente necesitando de *alguien que sepa cosas ajenas al recetario*.

Al final vemos que el acierto de Rovelli está lejos de los aciertos de De Broglie-Bohm o de GRW, quienes logran dar una mejor explicación de (A) y (B), tomando el camino opuesto; modificando la teoría y por tanto evitándonos la turbulencia de un mundo de observadores. Pero en cualquier caso, el camino vale las penas, regalándonos siempre nueva física.

Superposición Macroscópica

A.1. Evolución lineal

En este apéndice daremos una descripción un poco más detallada sobre la interacción entre una partícula cuántica (electrón de espín- $\frac{1}{2}$) y un aparato macroscópico (como el de la figura 2.1). Se seguirá la exposición hecha en [11].

Supongamos que el estado inicial de un electrón es

$$|\psi(0)\rangle_e = |+x\rangle_e = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_e + |-z\rangle_e), \quad (\text{A.1})$$

y se introducirá en un aparato de medición construido específicamente para medir el espín de un electrón en la dirección z de su marco de referencia. El aparato contiene una pantalla digital que marca tres de sus diferentes estados, On , $+z$ y $-z$. Significan que se encuentra listo para medir un electrón, que midió su espín en $+z$ o que lo midió en $-z$ respectivamente. Internamente el aparato está compuesto por un elemento mecánico cuyo único grado de libertad es el eje y , y su estado está descrito por la función de onda $\phi(y)$. La construcción del aparato es tal que si el elemento mecánico se encuentra en $y = 0$, la pantalla marca On . Si entra un electrón con espín en $+z$, el elemento mecánico se desplazará una cierta distancia en la dirección $+y$ y si entra un electrón con espín en $-z$, el elemento mecánico se desplazará en la dirección $-y$.

Como la posición en y del elemento mecánico es la propiedad que nos interesa del aparato macroscópico, lo caracterizaremos por ella. Por simplicidad el hamiltoniano libre del elemento mecánico será cero, al igual que el hamiltoniano libre que corresponde al grado de libertad del espín del electrón. Entonces la interacción entre el electrón y el aparato estará caracterizado por el Hamiltoniano de interacción:

$$\hat{H}_I = 2i\hbar\lambda\left(\frac{\partial}{\partial_2}\right) \otimes S_z \quad (\text{A.2})$$

A. SUPERPOSICIÓN MACROSCÓPICA

con λ una constante. Siendo así, el estado inicial del sistema electrón-aparato lo podremos describir como

$$|\Psi(0)\rangle = \phi(y) \otimes |\psi(0)\rangle = \phi(y) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle + |-z\rangle_e), \quad (\text{A.3})$$

con \hat{H}_I como el hamiltoniano total \hat{H} . Ahora por medio del postulado dinámico de Schrödinger podemos conocer la función de estado del sistema completo al tiempo t

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}t} |\Psi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi(y - \lambda t) \otimes |+z\rangle_e + \phi(y + \lambda t) \otimes |-z\rangle_e). \quad (\text{A.4})$$

La última ecuación se debe a que la primera parte del Hamiltoniano es un operador de traslaciones en y y sólo opera en $\phi(y)$. Por último, si nombramos $\phi(y = 0)$ como $|On\rangle_m$, a $\phi(y - \lambda t)$ como $|+z\rangle_m$ y a $\phi(y + \lambda t)$ como $|-z\rangle_m$ y representamos al operador de evolución temporal $e^{-\frac{i}{\hbar}\hat{H}t}$ como una flecha, obtendremos la ecuación (2.6) que es la versión simplificada de la ecuación (A.4)

$$|On\rangle_m \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_e + |-z\rangle_e) \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|+z\rangle_m \otimes |+z\rangle_e + |+z\rangle_m \otimes |-z\rangle_e) \quad (\text{A.5})$$

La Mecánica Cuántica Relacional

B.1. Posibles objeciones a la Observación Principal

En este Apéndice se continuará con la exposición de las objeciones que se podrían pensar en contra de la observación principal según Rovelli, objeciones que el mismo intenta responder.

Objeción 4. *Como en la objeción 2 (únicamente los resultados de las mediciones son físicos), pero la verdad del caso es que O está bien y P está mal. Si P está mal, la mecánica cuántica no podría ser aplicada al sistema $S - O$. Entonces esta objeción predice discrepancias, hasta ahora nunca observadas con las predicciones de MC, que incluyen efectos de interferencia observables entre los dos términos de la descripción (3.2).*

Objeción 5. *Como en la objeción 2, pero bajo la suposición de que O es macroscópico. Entonces los términos de interferencia se vuelven extremadamente pequeños por efectos de de-coherencia. Si son lo suficientemente pequeños, serán inobservables, entonces $q = 1$ se convierte en una propiedad absoluta de S , la cual es verdad y absolutamente determinada, aunque desconocida para P , quien puede medirla en cualquier momento y no encontrará efectos de interferencia. Rovelli dice que esta objeción es errónea por que la de-coherencia depende de qué observación hará P . Por lo tanto la propiedad $q = 1$ de S se convertiría en una propiedad absoluta al tiempo t_2 , o no, de acuerdo a qué propiedades de S considerará P . Y por esta razón la decoherencia se ha explotado en las teorías de historias consistentes (CH) según Rovelli.*

Objeción 6. *No hay un colapso. La descripción (3.1) no es correcta, porque “la función de onda nunca colapsa”. La descripción (3.2) es la correcta. No hay valores asignados a propiedades clásicas del sistema; sólo hay estados cuánticos. Si fuera así, según el autor entonces el observador P no podría medir el valor de la propiedad q tampoco, ya que (por suposición) no hay valores asignados a propiedades clásicas, únicamente estados cuánticos; entonces la cantidad q nunca tiene un valor. Pero describi-*

mos el mundo en términos de “propiedades” que los sistemas tienen y valores asumidos por varias cantidades, no en términos de los estados en el espacio de Hilbert. En una descripción del mundo puramente en términos de estados cuánticos, los sistemas nunca tendrían propiedades bien definidas y para Rovelli no está claro como conectar esto con alguna observación.

***Objeción 7.** No hay un colapso. La descripción (3.1) no es correcta, porque “la función de onda nunca colapsa”. La descripción (3.2) es la correcta. Los valores asignados a las propiedades clásicas son diferentes de rama a rama. Rovelli entiende esta como la propuesta de Everett. Las propiedades de las partículas no son absolutamente verdaderas, únicamente son verdaderas relativo a qué rama las describe. En este sentido algunas teorías hacen uso de aparatos o bases (distinguidas de las demás) que asignan los valores. Pero estas versiones de la idea de Everett violan Hip.1 y por lo tanto Rovelli las deshecha, por otro lado hay versiones que rechazan la especificación de aparatos o bases preferidas como lo son CH.*

***Objeción 8.** Lo que es absoluto e independiente del observador es la probabilidad de una secuencia A_1, \dots, A_n de atribución de propiedades (tal que los términos de interferencia mencionados antes, son extremadamente pequeños); esta probabilidad es independiente de la existencia de cualquier observador midiendo propiedades. Según el autor, esta objeción es correcta. De hecho esta observación se encuentra en la raíz de las interpretaciones de historias consistentes. Sin embargo para Rovelli, CH confirma OP ya que aunque la probabilidad de una secuencia de eventos en una familia consistente de secuencias no depende del observador, las probabilidades sí dependen en la elección de la familia consistente de historias.*

Las objeciones a la observación principal de Rovelli se tradujeron de las originales presentadas a continuación:

Objection 1. Whether the account (3.1) or the account (3.2) is correct depends on which kind of system O happens to be. There are systems that induce the collapse of the wave function. For instance, if O is macroscopic (3.1) is correct, if O is microscopic (3.2) is correct.

Objection 2. What the discussion indicates is that the quantum state is different in the two accounts, but the quantum state is a fictitious non-physical mental construction; the physical content of the theory is given by the outcomes of the measurements

Objection 3. As before (only outcomes of measurements are physical), but the truth of the matter is that P is right and O is wrong.

Objection 4. As before (only outcomes of measurements are physical), but the truth of the matter is that O is right and P is wrong.

Objection 5. As before, but under the assumption that O is macroscopic. Then interference terms become extremely small because of decoherence effects. If they are small enough, they are unobservable, and thus $q = 1$ becomes an absolute property of S , which is true and absolutely determined, albeit unknown to P , who could measure it anytime, and would not see interference effects.

Objection 6. There is no collapse. The description (3.1) is not correct, because “the wave function never really collapses”. The account (3.2) is the correct one. There are no values assigned to classical properties of system; there are only quantum states.

Objection 7. There is no collapse. The description (3.1) is not correct, because “the wave function never really collapses”. The account (3.2) is the correct one. The values assigned to classical properties are different from branch to branch.

Objection 8. What is absolute and observer independent is the probability of a sequence A_1, \dots, A_n of property ascriptions (such that the interference terms mentioned above are extremely small decoherence); this probability is independent from the existence of any observer measuring these properties.

Bibliografía

- [1] DAVID Z ALBERT. *Quantum mechanics and experience*. Harvard University Press, 2009. [5](#)
- [2] JOHN S BELL. **Are there quantum jumps?** In *Quantum Mechanics, High Energy Physics And Accelerators: Selected Papers Of John S Bell (With Commentary)*, pages 866–886. World Scientific, 1995. [37](#)
- [3] JOHN S BELL. **Quantum mechanics for cosmologists**. In *Quantum Mechanics, High Energy Physics And Accelerators: Selected Papers Of John S Bell (With Commentary)*, pages 793–819. World Scientific, 1995. [36](#)
- [4] JOHN STEWART BELL. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy*. Cambridge university press, 2004. [11](#)
- [5] PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC. *The principles of quantum mechanics*. Number 27. Oxford university press, 1981. [5](#), [17](#)
- [6] TIM MAUDLIN. **Three measurement problems**. *topoi*, **14**(1):7–15, 1995. [5](#)
- [7] TIM MAUDLIN. *Philosophy of physics: Space and time*. Princeton University Press, 2012. [2](#)
- [8] N DAVID MERMIN. **Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory**. *Physics today*, **38**(4):38–47, 1985. [41](#)
- [9] ELIAS OKON. **El problema de la medición en mecánica cuántica**. *Revista mexicana de física E*, **60**(2):130–140, 2014. [5](#)
- [10] ELIAS OKON AND DANIEL SUDARSKY. **On the consistency of the consistent histories approach to quantum mechanics**. *Foundations of Physics*, **44**(1):19–33, 2014. [39](#), [41](#)
- [11] ELIAS OKON AND DANIEL SUDARSKY. **The consistent histories formalism and the measurement problem**. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **52**:217–222, 2015. [45](#)

BIBLIOGRAFÍA

- [12] ELIAS OKON AND DANIEL SUDARSKY. **Less decoherence and more coherence in quantum gravity, inflationary cosmology and elsewhere.** *Foundations of Physics*, **46**(7):852–879, 2016. [5](#), [11](#)
- [13] CARLO ROVELLI. **Relational quantum mechanics.** *International Journal of Theoretical Physics*, **35**(8):1637–1678, 1996. [15](#)
- [14] ERWIN SCHRÖDINGER. *What is life?: With mind and matter and autobiographical sketches.* Cambridge University Press, 1992. [27](#)