



**UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA**  
Unidad Iztapalapa

---

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Servicio Social

“Apoyo a la investigación en interpretaciones de la mecánica cuántica”  
ICSH0001127

El peso ontológico del concepto clásico de identidad en la  
interpretación relacional de la mecánica cuántica.

Realizado por: Prado López Fernanda Andrea

Matrícula: 2173055959

Asesor: Dr. Miguel Ángel Bastarrachea Magnani

17 de enero de 2025

Iztapalapa, Ciudad de México

El peso ontológico del concepto clásico de identidad en la interpretación relacional de la mecánica cuántica.

Prado López Fernanda Andrea

División de Ciencias Sociales y Humanidades

Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (México)

fernanda.prado.uam.5@gmail.com

El peso ontológico del concepto clásico de identidad en la interpretación relacional de la mecánica cuántica.

1. Introducción.
2. ¿Qué es la mecánica cuántica?
  - 2.1 Bosones y fermiones.
3. Mecánica cuántica relacional.
4. El principio de identidad de los indiscernibles.
5. Distinguibilidad e indistinguibilidad en la mecánica cuántica.
  - 5.1 Conflictos de la teoría cuántica con la noción de identidad.
  - 5.2 El problema conceptual de la identidad en la mecánica cuántica.
  - 5.3 La importancia del experimento.
6. Análisis. El principio de identidad de los indiscernibles (PII) y la interpretación relacional de la mecánica cuántica (MCR).
7. Conclusiones.

Referencias.

## 1. Introducción.

Imaginen un mundo donde la realidad no es fija, que depende de procesos muy complejos y los cuales son difícilmente medidos sin una precisión completa para el estándar de la física clásica. Pues bien, esto es lo que plantea la mecánica cuántica. En estas notas vamos a explorar algunos postulados de la mecánica cuántica que desafían nuestra intuición clásica de la noción de identidad, invitándonos a repensar la naturaleza misma de la realidad.

Es de aclarar que para las siguientes notas se vinculan propuestas desde distintos contextos históricos del conocimiento y, por tanto, con métodos distintos con los que se apoyaron para llegar al conocimiento que han compartido. Primero, de modo que nos enfocaremos en el principio de identidad de los indiscernibles de Gottfried Wilhelm Leibniz, sus obras datan alrededor del año 1700, mientras que la mecánica cuántica ortodoxa se fundamenta a principios del siglo pasado y la interpretación relacional de la mecánica cuántica comenzó a finales del mismo. Entonces, siendo que hay una extensa línea de tiempo entre las propuestas, tendremos cuidado en vincular el postulado del filósofo Leibniz con lo que se propone en la mecánica cuántica relacional. Respecto a la obra de Leibniz, haré uso de tres de sus textos: *Cartas con Clarke* (), *Nuevos ensayos sobre el entendimiento humano* (), y *Escritos filosóficos*, edición de Olaso (). Mientras que, por otro lado, como apoyo principal para la vinculación entre el concepto de identidad de Leibniz y la mecánica cuántica, se ha hecho uso, principalmente, del texto *Identity in Physics. A Historical, Philosophical and Formal Analysis*, de French y Krause (2006), de donde sacamos la abreviatura para el principio de identidad de los indiscernibles, PII.

El principio de identidad de los indiscernibles establece que no es posible que dos objetos compartan todas sus propiedades, si no, se trataría del mismo objeto. Sin embargo, cuando nos adentramos en el reino de la mecánica cuántica, este principio se ve desafiado de manera fundamental. En particular, para la mecánica cuántica relacional (para abreviar, MCR), una interpretación que pone el foco en la relación entre sistemas, y nos invita a replantear nuestra comprensión de la identidad, porque aquí la identidad no es una propiedad intrínseca, sino que surge de la relación entre sistemas. Veremos cómo esta perspectiva muestra una comprensión diferente del universo a nivel cuántico y cuáles son sus implicaciones para el principio de identidad de los indiscernibles. Mostrar la diferencia del concepto de identidad entre el PII y el trato con la identidad desde la interpretación de la mecánica cuántica relacional constituye el

núcleo de estas notas para el análisis de la noción de la identidad dentro de la rama de la mecánica cuántica. No se busca mantener estrictamente un acuerdo entre ambas propuestas.

Analizaremos cómo es que participan la indistinguibilidad de las partículas idénticas, la naturaleza de la superposición cuántica y el papel de los hechos cuánticos en la determinación de la identidad. Así, a través de un breve estudio tomando en cuenta diferentes vías a tratar el principio de identidad para su aplicación en contextos cuánticos, buscaremos comprender cómo la mecánica cuántica relacional nos puede ofrecer su perspectiva sobre la naturaleza de la realidad y los límites de nuestra capacidad para distinguir entre objetos. Por otra parte, aquí no se intenta comparar la relación entre el PII y la MCR con otra interpretación cuántica, si acaso, simplemente se especificará cierta vinculación entre la mecánica cuántica tradicional (la de Copenhague) con dicha interpretación.

Me gustaría añadir otro detalle antes de comenzar estas notas, y es que es importante saber que el papel de la teoría general de la mecánica no es enumerar “los ingredientes del mundo”; si buscáramos algo similar a esto, podríamos referirnos a teorías mecánicas individuales como: el modelo estándar de la física de partículas, la relatividad general y el oscilador armónico. Pero no es nuestro caso. “El papel de la teoría general de la mecánica (como la mecánica clásica o mecánica cuántica) es proporcionar un marco general dentro del cual se realizan teorías constructivas específicas” (Rovelli 2018, 7-8).

Ahora, para dar guía al lector, se refieren las siguientes secciones para abordar el tema central; En la primera parte expongo nociones básicas y fundamentales de la teoría de la mecánica cuántica. En la segunda sección coloco una breve exposición de lo que engloba la interpretación relacional de la mecánica cuántica. En la tercera sección explico sobre en qué consiste el principio de identidad de los indiscernibles. En la cuarta sección se procurará explicar la vinculación de la mecánica cuántica y el PII como consecuencia de la investigación en la física cuántica. Y en nuestra última sección, abordaré un análisis (tomando en cuenta la información relevante de nuestras notas) para visualizar qué lugar tiene la identidad dentro de lo que se propone en la mecánica cuántica relacional.

## 2. ¿Qué es la mecánica cuántica?

La mecánica cuántica es una rama de la física cuyos principales objetos de estudio son los elementos que se encuentran a nivel microscópico; átomos, electrones y moléculas son ejemplos de estructuras de este nivel. Mientras que una teoría cuántico-mecánica está referida a un sistema de un número finito de partículas con un número finito de grados de libertad; además, las teorías cuánticas han de considerar una identificación de las magnitudes físicas que pueden representarse y una asociación de operadores con esas magnitudes, de manera que, siendo expresadas matemáticamente, sean equivalentes en lo que respecta a su núcleo operativo. El contenido del núcleo operativo de una teoría cuántica se engloba en: la estructura del álgebra, la asociación de ciertos operadores con procedimientos experimentales y en estados con procedimientos de preparación.<sup>1</sup>

Antes de especificar varios conceptos básicos que conforman a la mecánica cuántica, es importante mencionar que esta misma ha sido originada por un cúmulo de progresos científicos que se han englobado en la interpretación de Copenhague, la cual, en resumen, fue desarrollada principalmente por Niels Bohr y Werner Heisenberg, entre los años 1913 y 1925; mientras que su conexión con el experimento llega de manos de Max Born (1926), conforme a su regla que prescribe cómo calcular la probabilidad de encontrar una partícula en un estado al medir su función de onda. El axioma principal de esta interpretación afirma que los acontecimientos subatómicos solo son perceptibles como transiciones indeterministas físicamente discontinuas entre estados estacionarios discretos, para lo cual utiliza la función de onda con la que se calcula la probabilidad sobre los lugares donde se puede encontrar una partícula dependiendo de sus propiedades y de su entorno. Esto es expresado desde un formalismo matemático junto con una descripción esquemática.

Ahora, para poder comprender mejor esta rama de la ciencia hemos de especificar ciertos elementos que la componen. Primero, respecto a lo que es un estado cuántico, este denota una asignación de números a operadores que deben satisfacer las siguientes condiciones: positividad, normalización y linealidad. La positividad permite que a los operadores autoadjuntos se les vincule números reales no negativos. La normalización junto a la positividad garantiza que el

---

<sup>1</sup> Véase: Myrvold, Wayne C. 2022. "Chapter 2. Philosophical Issues Raised by Quantum Theory and its Interpretations". In *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*, edited by Olival Freire, 23-84. United Kingdom: Oxford University Press.

espectro (el conjunto de valores propios o eigenvalor(es)) de un operador autoadjunto acotado se mantenga dentro de los límites de los valores esperados correspondientes al promedio de una medición; lo cual es necesario para que las cifras se interpreten en los resultados de los experimentos. Mientras que la linealidad relaciona valores esperados a resultados de experimentos incompatibles, sin embargo, esta condición no se ha considerado rigurosamente dentro de la teoría cuántica a pesar de ser central en esta.

Por otro lado, respecto a lo que es un sistema cuántico y sus procesos físicos, es algo que se ha abordado desde diferentes enfoques según se haya tomado partido en una interpretación de la mecánica cuántica<sup>2</sup>. Pero por lo general se ha de mantener que estos sistemas albergan diferentes estados físicos (estados cuánticos) que pueden describirse a partir de ecuaciones.

En cuanto a las reglas para las posiciones y direcciones de las observables, estas son:

- Los operadores correspondientes a diferentes grados de libertad se conmutan. Esto significa que, para distintos  $i, j$ ,  $Q_i$  y  $P_i$  conmutan con  $Q_j$  y  $P_j$
- $[Q_i, P_i] = i\hbar 1$ , donde  $1$  es el operador de identidad, y  $\hbar = h/2\pi$ , donde  $h$  es la constante de Planck. El operador  $1$  es la identidad multiplicativa; el resultado de multiplicar cualquier operador  $A$  por  $1$  es el propio  $A$  (Myrvold 2022, 55)<sup>3</sup>

Luego, sobre la forma de cuantificar la dispersión en la distribución de probabilidad de los resultados de un experimento, se toma un principio interpretativo de las teorías cuánticas denominado como el vínculo entre el estado y el valor propio. Tomemos por ejemplo que “para cualquier estado  $\rho$  y cualquier operador autoadjunto  $A$ , sea  $a$  el valor esperado de  $A$  en el estado  $\rho$ ,  $\rho(A)$ . Definimos la varianza de  $A$  en el estado  $\rho$  como,  $\text{Var}(A) = \rho((A - a)²) = \rho(A²) - \rho(A)²$ ” (Myrvold 2022, 56). De la dispersión se dirá, por tanto, que es pequeña si la distribución está muy cerca del valor esperado de  $\rho(A)$ , o será cero cuando haya un único resultado obtenido con probabilidad de uno, si este es el caso se dice que  $\rho$  es un estado propio de  $A$ , con valor propio

---

<sup>2</sup> Unos ejemplos son: la propuesta por Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, llamada Interpretación del colapso objetivo, en el artículo *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems* (1986); la de Variables ocultas de John von Neumann en *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1927); o la de Hugh Everett, Interpretación de los mundos múltiples, en su tesis doctoral “Sobre los fundamentos de la mecánica cuántica”, y puede encontrarse su propuesta en el artículo: *‘Relative state’ formulation of quantum mechanics* (1957).

<sup>3</sup> Es mía la traducción de las citas en este documento.

$\rho(A)$ , y asimismo se considerará como un estado en el que el sistema tiene energía  $A$ , si es que  $A$  es el operador energía que es medido.

En lo que respecta a los estados, estos se pueden diferenciar entre estados separables y estados enredados (no separables). Donde un estado que es un estado producto o mixto, que igual podría considerarse una mezcla de estados producto, por lo general se denomina estado separable; mientras que un estado puro, es decir, que no es una mezcla de dos estados distintos, se le conoce como estado enredado. En esto se muestra una diferencia entre las teorías cuántica y clásica, en tanto que se describe la característica de separabilidad o no separabilidad: por un lado, para una teoría clásica la especificación de los estados de los componentes determina de forma única el estado del compuesto; mientras que por el hecho de que esto no lo satisfagan las teorías cuánticas, estas se inclinan a la no separabilidad.

Lo siguiente que se ha de considerar es la ecuación básica de la evolución temporal, elaborada por Heisenberg (1925), donde el operador de densidad que representa el estado es independiente del tiempo.

$$i\hbar \frac{d}{dt} \hat{A}(t) = \hat{A}(t)\hat{H} - \hat{H}\hat{A}(t).$$

Asimismo, se han de tomar en cuenta dos representaciones en el espacio de Hilbert de una misma teoría cuántica y donde el contenido físico es el mismo, lo único que cambiará es la ubicación de la dependencia temporal en el aparato matemático utilizado para modelizar una situación física cambiante. Primero, para un estado puro representado por un vector de estado  $|\psi(t)\rangle$ , tenemos la siguiente ecuación con base en la ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle.$$

En esta ecuación para la elección de la representación del espacio de Hilbert resulta que los operadores son independientes del tiempo y representan, por ejemplo, la posición y el momento en el tiempo de un conjunto de partículas:  $(Q_i(t), P_i(t))$ .

Pasemos a lo que es la superposición cuántica. Esta ocurre cuando un objeto cuántico “posee simultáneamente” dos o más valores de una cantidad observable (por ejemplo, la posición

o la energía de una partícula). De esto resulta el problema de la medición, donde la aplicación de la evolución lineal a estados cuánticos termina en superposiciones de estados macroscópicamente distintos. Como ejemplo supongamos que analizamos un montaje experimental cuántico-mecánico:

Sea S el sistema sobre el que se va a experimentar, tiene al menos dos estados distinguibles, [...] [donde una observable S vale +1 o -1. Se] puede idear un aparato, A, que distinga estos estados, por lo tanto, existen conjuntos distinguibles A+ y A- de estados del aparato, que llamaremos estados indicadores; luego, ya acoplado al sistema S, sucede que si el aparato se inicia en un estado listo y el sistema estudiado indica el estado |+⟩<sub>S</sub>, el aparato evolucionará a un estado en A+, y si el aparato se inicia en un estado listo y el sistema estudiado muestra el estado |-⟩<sub>S</sub>, el aparato evolucionará a un

estado en A-. La evolución del sistema compuesto debe satisfacer

$$\begin{aligned} |+\rangle_S |R\rangle_{AE} &\Rightarrow |^+ \rangle_{SAE}; \\ |-\rangle_S |R\rangle_{AE} &\Rightarrow |^- \rangle_{SAE}; \end{aligned} \quad (11)$$

(Myrvold 2022, 61-62)

## 2.1 Bosones y fermiones.

Otro aspecto que he de abordar dentro de esta primera parte es la clasificación de dos tipos de partículas: bosones y fermiones, que han de ser tratadas conforme a las distribuciones estadísticas de Bose-Einstein y Fermi-Dirac.

Por un lado, los fermiones tienen espín semientero, estos incluyen a partículas como los electrones, protones, neutrones, quarks, etc., y son descritos por funciones antisimétricas bajo el intercambio de partículas. Mientras que se les llama partículas bosónicas a aquellas que tienen espín entero, como lo son los fotones, partículas alfa, piones, etc., y son descritas por funciones simétricas bajo el intercambio de partículas. Sobre los bosones se ha de señalar que “sus espines son iguales, [entonces] las partículas son idénticas y los procesos serán indistinguibles. [...] Sin embargo, si estamos hablando la probabilidad de ocupación de un estado cuántico por partículas idénticas con espín, entonces el espín puede dar lugar a diferencias físicas notables”<sup>4</sup> (Pereyra 2011, 288).

---

<sup>4</sup> En estados ‘idénticos’ son indiscernibles de forma directa (masa, carga), coinciden en sus indeterminaciones y su estado colectivo es simétrico. Cada espín de bosón gira en la misma dirección que el otro, a pesar de que ninguno de los dos gira en ninguna dirección determinada.



Ambos tipos de partículas fueron tomados en cuenta para el principio de exclusión de Pauli (1925), el cual señala que: “Si dos partículas [...] ocupan el mismo estado de una sola partícula [...] la función de onda total desaparecerá, ya que dos líneas del determinante serán idénticas” (Zettili 2001, 449), lo cual ocurre con los bosones. Sin embargo, en un sistema con partículas indistinguibles “no hay dos fermiones que puedan ocupar el mismo estado de una sola partícula a la vez; cada estado de una sola partícula puede ser ocupado como máximo por un fermión”<sup>5</sup> (449). Así, los fermiones respetan el principio de exclusión de Pauli. Prácticamente este principio se utilizó para distinguir la estructura de los átomos, teniendo “un efecto directo en la distribución de los fermiones” (449).

Por otro lado, S. Saunders escribe: “La respuesta a la pregunta de Quine -¿Son objetos las partículas cuánticas? - es por tanto: Sí, excepto los bosones elementales”.<sup>6</sup> Con ello señala que los bosones elementales (aquellos que, como los fotones, no están compuestos de fermiones) entrelazados no tienen razón de ser siquiera débilmente discernibles. Con eso comienza el conflicto, puesto que el principio de identidad de los indiscernibles (el cual expondré más adelante) debería prohibir plantear bosones elementales como partes propias de un sistema de bosones simétricos.

Luego, en cuanto a las estadísticas de Bose-Einstein y Fermi-Dirac, podemos decir que las diferencias radican en los números de ocupación y, por tanto, en los signos. Esto plasma de cierto modo el cómo está constituida la naturaleza. “En la estadística de Bose-Einstein [...] [el conjunto de números de ocupación de los estado cuántico del bosón] puede ser cualquier entero, incluido el cero; esto significa que

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{(\mu-E_j)nj/kBT} = 1 + e^{(\mu-E_j)/kBT}$$

Donde  $\mu$  es el potencial químico,  $T$  es la temperatura y  $kB$  es la constante de Boltzmann.

---

<sup>5</sup> De manera más detallada he de citar lo siguiente: “la asimetría de la función de onda asegura que no puede haber dos fermiones que tengan las mismas propiedades intrínsecas, o independientes del estado, ni las mismas propiedades dependientes del estado expresadas por los valores de expectativa de todas las magnitudes físicas de la mecánica cuántica” (French y Krause 2006, 154).

<sup>6</sup> Véase: Saunders, Samuel. 2006. “Are quantum particles objects?” *Analysis* 66: 52–63. doi.org/10.1093/analys/66.1.52  
 Quine, Willard. 1976. “Whither physical objects?” *Essays in Memory of Imre Lakatos* 39: 497–504. doi: 10.1007/978-94-010-1451-9\_29  
 Quine, Willard. 1990. *The Pursuit of Truth*. Cambridge: Harvard University Press.

Mientras que en la estadística de Fermi-Dirac [...] [el conjunto de números de ocupación] sólo puede tomar los valores 0 o 1. En consecuencia” (Pereyra 2011, 293).

$$\sum_{n=0}^{\infty} e^{(\mu-E_j)n/kBT} = \frac{1}{1-e^{-(\mu-E_j)/kBT}}$$

“En un sistema de partículas idénticas, es fundamental precisar el número de partículas en cada estado cuántico, es decir, el conjunto de números de ocupación [...]. Dependiendo de si son bosones o fermiones, con esta información se puede obtener la energía del sistema” (Pereyra 2011, 293). Además, se pueden construir “las funciones de onda simétrica y antisimétrica para un sistema de dos partículas idénticas que no interactúan en términos de las funciones de onda de una sola partícula [...]” (Zettili 2001, 449).

$$\psi_s(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_{n_1}(\xi_1) \psi_{n_2}(\xi_2) + \psi_{n_1}(\xi_2) \psi_{n_2}(\xi_1)]$$

$$\psi_a(\xi_1, \xi_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_{n_1}(\xi_1) \psi_{n_2}(\xi_2) - \psi_{n_1}(\xi_2) \psi_{n_2}(\xi_1)]$$

Considérese a  $\xi_1, \xi_2$ , como los estados de dos partículas.

Esto se vincula estrechamente al tema principal de estas notas, al igual que los siguientes aspectos: “para describir una partícula, no podemos especificar más que un conjunto completo de observables conmutables [...] [, además,] no existe ningún mecanismo para etiquetar las partículas como en la mecánica clásica” (Zettili 2001, 442-43). Y hemos de añadir que “debido al principio de incertidumbre, el concepto de trayectoria de una partícula carece de sentido. Aunque la posición de una partícula se determine exactamente en un instante, no es posible precisar sus coordenadas en el instante siguiente. Así, las partículas idénticas pierden su identidad (individualidad) en la mecánica cuántica” (443).

Sin embargo, el debate de considerar o no la identidad e individualidad de las partículas ha sido bastante amplio<sup>7</sup>. Para concluir esta sección solo he de resaltar que, siendo que existen varias interpretaciones de la mecánica cuántica para abordar una gran cantidad de cuestiones epistemológicas y ontológicas que surgieron con el origen de esta rama de la física, este trabajo se limitará a tratar solamente con la interpretación relacional que propone el físico Carlo Rovelli.

---

<sup>7</sup> Como podemos ver en el texto de French, Steven and Décio Krause. 2006. *Identity in Physics. A Historical, Philosophical and Formal Analysis*. New York: Oxford University Press.

### 3. Mecánica cuántica relacional.

La interpretación relacional de la mecánica cuántica la propuso el físico Carlo Rovelli por primera vez en su artículo “Relational quantum mechanics” (1996) en la revista *International Journal of Theoretical Physics*. De ella se ha señalado que se ha de considerar como una extensión mínima de la interpretación de Copenhague en cuanto al manejo de las mediciones en la mecánica cuántica, de manera que “para los hechos relativos, toda interacción puede considerarse una [...] [medida, desde la interpretación de Copenhague], pero sólo para los sistemas implicados” (Rovelli 2022, 1060). Y al mismo tiempo se considera como “una crítica a la noción habitual de «estado cuántico». [...] [Siendo que se afirma que el] «estado» no debe tomarse como una noción absoluta, es decir, independiente del observador, sino más bien como un dispositivo de contabilidad relativo a un observador específico” (Martin-Dussaud, Rovelli y Zalamea 2019, 3). Conforme a esto se han de explicar algunos conceptos determinantes.

En primer lugar, ¿aquí qué se entiende por observador? Ha de saberse que “los observadores no son «sistemas físicamente especiales» en ningún sentido” (Rovelli 1996, 1654), es decir, “cualquier sistema físico puede desempeñar el papel de «observador»” (Rovelli 2022, 1060).

En segundo lugar, respecto al estado del sistema se menciona que en vez de este término: “se ha introducido la noción de información que un sistema tiene sobre otro sistema. No considero la noción de información como «metafísica», sino como una noción concreta” (Rovelli 1996, 1657). Asimismo, Rovelli utiliza “la teoría de la información en su forma original (Shannon)<sup>8</sup>, en la que la información es una medida del número de estados en los que puede estar un sistema, o en los que pueden estar varios sistemas cuyos estados están físicamente limitados (correlacionados)” (1642). Lo que quiere decir que la palabra “información” será usada solamente “para denotar el carácter relacional de toda afirmación contingente sobre valores de magnitudes físicas o estados de sistemas” (1653); de tal forma que quede claro que “la información es correlación” (1653). Conviene señalar que: “la correlación no tiene un significado absoluto, porque los estados no tienen un significado absoluto, y debe interpretarse como el

---

<sup>8</sup>Shannon consideraba la información como una entidad que se puede cuantificar y transmitir, a la vez que es independiente del contenido o significado. El punto central de esta postura, es la estructura y transmisión de la información o mensajes. Para más detalles véase: Shannon, Claude Elwood. 1948. “A mathematical theory of communication”. *The Bell System Technical Journal* 27: 379–423.

contenido de la información que un tercer sistema tiene sobre el par S-O” (Rovelli 1996, 1669), es decir, del sistema observado y el observador.

Continuamos con otra característica de esta interpretación. Rovelli interpreta la mecánica cuántica como una teoría sobre sucesos de hechos físicos:

La teoría proporciona amplitudes de transición de la forma  $W(b, a)$  que determinan la probabilidad  $P(b, a) = |W(b, a)|^2$  para que se produzca un hecho (o un conjunto de hechos)  $b$ , dado que se ha producido un hecho (o un conjunto de hechos)  $a$ . Los hechos son las variables independientes de las amplitudes de transición cuántica. Un hecho es, por ejemplo, que una partícula tenga un valor determinado de un componente de espín en un momento determinado, o que se encuentre en un lugar determinado en un momento determinado. (Rovelli 2022, 1057)

Debemos añadir que, debido a la aleatoriedad cuántica (indeterminismo irreductible), sólo puede ser aproximada la estabilidad de los hechos.

Entonces, se ha de notar que “el estado es una codificación [y registro] de nuestra información [sobre las propiedades de un sistema relativas al observador]; no algo que la partícula «tenga»” (Rovelli 2022, 1061). Y así mismo se sostiene que “las propiedades no existen en todo momento: son propiedades de los sucesos y los sucesos ocurren en las interacciones [entre el sistema observado y el sistema observador]” (1066).<sup>9</sup>

Conforme a esto, “la información relevante (o simplemente información) que [por decir] O [el sistema observador] tiene sobre S se define como el contenido no trivial de la cadena (potencialmente infinita) [de información]” (Rovelli 1996, 1656), para predecir futuras respuestas, a lo largo de una dirección determinada, de las posibles preguntas que disponga el observador. “Dado que la cantidad de información que O puede tener sobre S está limitada [...], [claramente] cuando se adquiere nueva información, parte de la antigua información relevante debe volverse irrelevante” (1658). Esto fundamenta que “el valor real de todas las magnitudes físicas de todos los sistemas sólo tiene sentido en relación con otro sistema” (Rovelli 2022, 1066) que ha de constatar la información del sistema estudiado.

En suma, se puede afirmar que desde esta interpretación “la mecánica cuántica puede considerarse una teoría sobre los estados de los sistemas y los valores de las magnitudes físicas

---

<sup>9</sup> Al respecto, sucede que el espacio de Hilbert (en el que están los vectores de estado) no está ligado a un sistema, sino al par sistema-observador.

en relación con otros sistemas” (Rovelli 1996, 1648). Y finalmente, “nos vemos obligados a aceptar el resultado de que no hay un significado "objetivo", o más precisamente, "independiente del observador", para la atribución de una propiedad a un sistema” (1669).

#### **4. El principio de identidad de los indiscernibles.**

En esta sección plantearé un esbozo de lo que implica la propuesta del filósofo Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) sobre el principio de identidad de los indiscernibles, para que se puedan distinguir sus puntos fuertes y débiles que se vincularán en el análisis posterior sobre su vinculación con la mecánica cuántica relacional.

Este principio es consolidado por Leibniz en la siguiente afirmación: “Nunca vemos ni nos resulta posible concebir que dos cosas de la misma especie puedan existir al mismo tiempo y en el mismo lugar” (Leibniz 1983, 267). De modo que si se preguntara “*si una cosa es la misma o no*” sabemos que lo referimos a algo que existe en un tiempo y lugar determinados; “de lo cual se deduce que una cosa no puede tener dos comienzos de existencia, ni dos cosas un solo comienzo en relación al tiempo y al lugar” (267). Por lo tanto, solo se admite el que “proponer dos cosas indiscernibles es proponer la misma cosa bajo dos nombres” (Rada 1980, 79), o en realidad solo se tratará de dos objetos; de lo contrario “la suposición es falsa y contraria al gran principio de la razón” (106).

Por otro lado, Leibniz afirmó: “yo sostengo que toda sustancia creada está acompañada de materia” (Rada 1980, 69), continuando con que de cada objeto “cada porción de materia está actualmente subdividida en partes diferentemente movidas y ninguna se parece enteramente a otra” (105), entonces, “no puede darse ninguna razón para que un cuerpo de pequeñez determinada no sea ulteriormente divisible” (Leibniz 1982, 344). En cuanto a la unidad de las sustancias u objetos, también llamada identidad, está constituida por “la organización que posee de partes en un solo cuerpo que participa de una vida común, lo cual dura [...] aunque cambie de partes” (Leibniz 1983, 269).

Ahora, respecto a lo que es la figura de un objeto se afirma que es: “un accidente que no pasa de un sujeto a otro (*de subjecto in subjectum*). De manera que hay que decir que, tanto los cuerpos organizados como otros muchos, se mantienen como los mismos sólo en apariencia, y no hablando en rigor. Más o menos como es un río, que siempre cambia de agua” (Leibniz 1983,

269). En efecto, “todo cuerpo es alterable e incluso está actualmente alterado siempre, de manera que difiere de otro en sí mismo” (Leibniz 1983, 268), y siendo así, con cambios continuos, se afirma que “la belleza de la naturaleza los exige para que pueda haber percepciones distintas. No vemos las etapas infinitésimas del cambio, y así parece haber discontinuidad donde en realidad no la hay” (Copleston 1996, 275). Además:

La ley de continuidad<sup>10</sup> es complementaria del principio de la identidad de los indiscernibles. Porque la ley de continuidad enuncia que en la serie de las cosas creadas está ocupada toda posición posible, mientras que el principio de la identidad de los indiscernibles enuncia que cada posición posible es ocupada [...] solamente una vez. (Copleston 1996, 275)

Luego, en cuanto a lo que Leibniz llamó identidad personal, expuso que: “Si los vegetales y los brutos no poseen alma, su identidad no es más que aparente; pero si la tienen, su identidad individual es auténtica hablando en rigor, aunque sus cuerpos organizados no la tengan” (Leibniz 1983, 270). Porque el cuerpo está en flujo continuo, mientras que la identidad de una misma sustancia individual solo puede ser mantenida por medio de la conservación de la propia alma, “así pues, la cuestión radica en que no se puede juzgar por las apariencias” (273), y será que la misma presencia de una sustancia “no es suficiente para la percepción: un ciego, e incluso un distraído, no ve” (Rada 1980, 70).

Entonces, lo que se propuso sobre la forma de distinguir es que esta se basa en “el supuesto de que la penetración no es conforme a la naturaleza” (Leibniz 1983, 268), pero no se puede limitar dicho principio a esta condición, puesto que existen ejemplos de hechos, como: “dos sombras o dos rayos de luz que se interpenetran, y podríamos forjarnos un mundo imaginario en el cual los cuerpos hiciesen otro tanto. Sin embargo, no dejamos de distinguir un rayo de otro por la trayectoria de su paso, incluso cuando se cruzan” (268).

---

<sup>10</sup> La idea básica sobre el principio o ley de continuidad es que no hay contraste tan grande que excluya una transición racional de un elemento real a otro. Además, acarrea la no-contradicción; una realidad contradictoria sería discontinua porque estaría en conflicto consigo misma. Por ello, igualmente se afirma que contiene al principio de razón suficiente, puesto que requiere que existan motivos o causas que fundamenten que algo sea de tal o cual manera. Véase: Leibniz, Gottfried Wilhelm. 1889. *La Monadología: opúsculos*. §32. España: Biblioteca de la Universidad de Sevilla. Por otro lado, Leibniz recalca que estos principios, el “de «razón suficiente» y de «identidad de los indiscernibles» cambian el estado de la metafísica, la cual por medio de ellos se vuelve real y demostrativa” (Rada 1980, 79), siendo así que: “la necesidad absoluta y metafísica depende del [...] gran principio de nuestro razonamiento, que es el de las esencias, es decir, el de la identidad o la contradicción, puesto que lo que es absolutamente necesario es lo únicamente posible entre las alternativas” (101). Otro modo en que se han vinculado estos principios es que se afirma que “Leibniz trató de deducir del principio de razón suficiente la conclusión de que no puede haber dos sustancias indiscernibles” (Copleston 1996, 272), por lo que podría parecer que implica que el principio de identidad es contingente.

Hasta aquí se puede decir que: “el principio es utilizado en diversos sentidos: un sentido verificacionista, según el cual dos estados de cosas carentes de criterio de distinción son el mismo estado; otro, según el cual una afirmación verdadera de un estado de cosas preserva su valor de verdad si se aplica a otro estado de cosas idéntico” (Rada 1980, 38-39).

Por consiguiente, se entiende que “*la noción completa o perfecta de la substancia singular involucra todos sus predicados pretéritos, presentes y futuros*” (Leibniz 1982, 342), entonces, “cada vez que cambia la denominación de la cosa, debe ocurrir alguna variación en la cosa misma” (342). Así, “no podría decirse que dos substancias fueran "dos" y "diferentes" si no tuviesen predicados diferentes” (Copleston 1996, 273).

Podemos concluir este apartado con que así es la naturaleza de la verdad, de acuerdo con Leibniz: “siempre expresa o implícitamente idéntica” (Leibniz 1982, 340), y solo serán verdades primeras “aquellas que enuncian lo mismo de sí mismo o niegan el contrario del propio contrario” (339).

## **5. Distinguibilidad e indistinguibilidad en la mecánica cuántica.**

Siendo que ya hemos abordado, de manera general, varios puntos importantes para tratar esta sección, es necesario detenernos a considerar que el problema de la distinguibilidad en la mecánica cuántica tiene muchas vertientes, algunas más trabajadas que otras. Por lo tanto, sería pertinente que se trate de enfocar las nociones que formalmente y por lo general se han aceptado en la teoría de la mecánica cuántica para tratar el aspecto de la identidad en los procesos cuánticos. Así que podremos observar parte del tema que continúa en actualización, y se señalarán sus puntos fuertes y débiles para continuar con nuestro análisis. Otro punto importante a aclarar es que en parte de esta sección nos centraremos en las dos formas estándar de la estadística ocupada en la mecánica cuántica: Bose-Einstein y Fermi-Dirac.

Comencemos con una clasificación que señalan French y Krause (2006) sobre tres formas del Principio de identidad de los indiscernibles (PII), la cual depende del tipo de atributos a considerar: “PII(1), afirma que no es posible que dos individuos posean todas las propiedades y relaciones en común; PII(2) excluye las propiedades y relaciones que pueden describirse como espacio-temporales; mientras que la forma más fuerte PII(3), incluye sólo propiedades

monádicas<sup>11</sup>, no relacionales” (French y Krause 2006, 156). Podemos darnos una idea al respecto sobre cuál de estas divisiones podría ser más útil a tratar en la discusión. No podemos quedarnos con la última, PII(3), debido a la naturaleza de las partículas que se estudian en la mecánica cuántica. Sobre la segunda, es difícil poder determinar que las partículas cumplan esta condición durante todo el proceso de estudio. Entonces, hemos de optar por indagar de qué forma la propuesta más débil del PII puede tener mayor participación en la teoría cuántica.

Ahora, señalemos tres características que definen la genidentidad material<sup>12</sup> (Reichenbach, 1956) y que son funcionales desde la mecánica clásica: “Continuidad [de trayectoria], impenetrabilidad, posibilidad de etiquetar” (French y Krause 2006, 49). Las primeras dos son “componentes vitales de la Individualidad Espacio-Tiempo” (47).

Respecto a la etiqueta, esta puede entenderse como “una especie de marcador de posición que nos permite hablar efectivamente de objetos, cuya individualidad se entiende entonces a través de esta forma de PII” (French y Krause 2006, 177). Podemos vincularlo a la mecánica cuántica diciendo que se han etiquetado estados con superíndices y al mismo tiempo consideremos que “los diferentes estados se caracterizan por diferentes funciones de estado. Ahora se puede introducir un segundo conjunto de etiquetas que ayudan a especificar qué partículas se encuentran en qué estados [...]”:

$$(1') |a_1^1\rangle \otimes |a_2^1\rangle$$

$$(2') |a_1^2\rangle \otimes |a_2^2\rangle$$

$$(3') |a_1^1\rangle \otimes |a_2^2\rangle$$

$$(4') |a_1^2\rangle \otimes |a_2^1\rangle.$$

(French y Krause 2006,145).

Sobre estas características se ha afirmado que no funcionan por completo en la mecánica cuántica, entonces, se ha sugerido que “la genidentidad material debe ser sustituida por la

---

<sup>11</sup> Una propiedad monádica se refiere a la característica que, de manera similar a las llamadas por Leibniz “mónadas” (que son sustancias simples), cada individuo es único. En su origen, Leibniz desarrolló una teoría metafísica de la sustancia, proponiendo que la realidad está compuesta por mónadas, cada mónada es única y refleja todo el universo desde su propia perspectiva interna. La interacción entre las mónadas y su percepción contribuyen a la coherencia del mundo.

<sup>12</sup> La “genidentidad” es la relación que conecta diferentes estados de un objeto en diferentes momentos. Reichenbach afirmaba que nuestra noción de identidad física se basa en las propiedades de esta relación. Véase: Reichenbach, Hans. 1956. *The Direction of Time*. USA: University of California Press.



«genidentidad funcional»<sup>13</sup> (French y Krause 2006, 50); mientras que otra opción señala que se evite la cuestión de la individualidad “reformulando nuestra caracterización del espacio-tiempo en términos de estructuras, en lugar de objetos o cosas” (82). Además, se ha de saber que “los físicos a veces se refieren a las partículas caracterizadas por las mismas constantes como «partículas idénticas»” (Van Fraassen 1998, 73), sin embargo, no hemos de conformarnos con tal distinción si es que hay vacíos que causen confusión respecto a la cuestión sobre la identidad de las partículas. Es preferible que hagamos trabajar el principio de Leibniz, buscando alternativas para evitar cabos sueltos en el tema.

Así pues, continuamos en búsqueda de alguna propiedad que sea físicamente significativa y que por utilidad distinga a las partículas. Por un lado, se ha discutido que si se ha de considerar el significado ontológico del principio de identidad, “necesitamos discutir si las partículas 1 y 2 tienen los mismos atributos físicos expresados por Q1 y Q2 y sus probabilidades de 'actualización' asociadas, reconociendo al mismo tiempo que estos atributos nunca pueden ser observados” (French y Krause 2006, 159). Con esto en mente se trata de afirmar que “tanto la individualidad como la distinguibilidad se basan en algún (sub)conjunto de propiedades de las partículas” (154). O bien, puede que nos baste “la diferencia extrínseca de comportamiento cinemático [...] [como condición] para su individualidad y reidentificabilidad transtemporal” (48), es decir, el hecho de que después de sus interacciones o movimientos aún se puedan identificar.

Para continuar nuestro cuestionamiento, igualmente, tendremos en cuenta que los estados que se enfocan más en la estadística de la mecánica cuántica son estos:

$$(5) |a^1\rangle \otimes |a^1\rangle$$

$$(6) |a^2\rangle \otimes |a^2\rangle$$

$$(7) \frac{1}{\sqrt{2}}(|a^1\rangle \otimes |a^2\rangle + |a^2\rangle \otimes |a^1\rangle)$$

$$(8) \frac{1}{\sqrt{2}}(|a^1\rangle \otimes |a^2\rangle - |a^2\rangle \otimes |a^1\rangle)$$

(French y Krause 2006, 155).

---

<sup>13</sup> A diferencia de la geneidentidad material, prescinde tanto de la impenetrabilidad como de la posibilidad de etiquetar, pero conserva su función para sustentar una noción de identidad física al relacionar los estados de los objetos.

Considere que 5, 6 y 7 son simétricos, mientras que 8 es antisimétrico; así mismo que 7 y 8 son superposiciones.

### 5.1 Conflictos de la teoría cuántica con la noción de identidad.

Ahora podemos pasar a lo que referimos a las partículas distinguidas por aplicar o no el principio de exclusión de Pauli. Se señala que este principio “concierno a su comportamiento agregado más que a su comportamiento individual; el principio se formula a grandes rasgos como la exclusión de la ocupación del mismo estado por más de una partícula de la clase dada [...] [, y los] fermiones son las partículas a las que se aplica el principio de exclusión” (Van Fraassen 1998, 74). Entonces, gran parte de la discusión que concierno a este principio, como al principio de identidad de los indiscernibles, se ha de centrar en los estados bosónicos.

Por otro lado, se ha señalado que en “el caso más discutido en la literatura [...] típicamente se asume que el supuesto quebrantamiento del PII depende de la consideración de estados como (5) o (6), donde a ambas partículas se les puede atribuir el mismo estado puro” (French y Krause 2006, 161). Además, sucede que cada “partícula «participa» claramente de *ambos* estados  $|a^1\rangle$  y  $|a^2\rangle$  en la superposición de estados producto expresada en (8)” (158). Así que se podría argumentar que ambas partículas en dicho estado también tienen las mismas propiedades dependientes del estado, y con esto no se puede cumplir el principio de identidad.

En cuanto a la cuestión del entrelazamiento y la superposición cuántica en conjunto con la noción de identidad, se sabe que si hablamos de estados enredados como los ilustrados en (7) y (8), insistimos en que no hay estados puros que puedan atribuirse a las partículas separadas y por lo tanto, se afirma que este tipo de estados poseen “una propiedad relacional que no puede reducirse a una propiedad monádica de las partículas” (French y Krause 2006, 191). Así mismo, se advierte la posibilidad de “que en el caso de objetos superpuestos más pequeños, las probabilidades de que presenten propiedades distintas pueden ser menores” (Teller 1983, 319). Claramente, aquí no podemos seguir el camino clásico para identificar las propiedades relevantes de las partículas.

Ahora, consideremos que se ha de ignorar la identidad de las partículas, al mismo tiempo que se afirme que cada posible asignación de números de ocupación a los diferentes niveles de energía es equiprobable, tal como llegó a suponer el físico Satyendra Nath Bose (1924). Pero la

teoría de la mecánica cuántica ya justificaba que se descartara la individualidad. Tomemos el ejemplo de: “la división correcta en casos equiprobables se obtiene si suponemos que todos los posibles estados agregados del «fotón-gas» son equiprobables, pero suponemos que se trata de estados compuestos simétricos” (Van Fraassen 1998, 80), entonces, siendo que los estados agregados de los bosones son simétricos, “implica que varios o incluso todos ellos pueden estar en el mismo estado puro a la vez. ( $\phi \otimes \phi$  es un estado simétrico de dos partículas)” (81). Sin embargo, se ha añadido que “la cuestión de si se vulnera o no el PII depende de la perspectiva del estado bifotónico que se adopte” (French y Krause 2006, 163), aunque algunos físicos, por ejemplo Paul Teller, objetan “que no es que en la práctica no podamos distinguir los dos fotones, sino que, en principio, no hay nada que pueda servir para individualizarlos” (162)<sup>14</sup>, siendo que, si dos partículas son del mismo tipo y tienen el mismo estado de movimiento, entonces, no hay nada en la descripción mecánico-cuántica que las distinga<sup>15</sup>.

Igualmente recordemos que la teoría cuántica describe a los fotones con aspectos tanto de partícula como de onda, lo que conduce a la posibilidad de que los estados de estas partículas pueden sumarse, o superponerse, para formar un nuevo estado. Así, dos partículas en el mismo estado es dado porque tienen esa característica. Conforme a esto se sugiere la comparación con dos patrones de ondas en una cuerda que pueden fusionarse para formar una sola onda finalmente. (Véase Fig. 1)



(Fig. 1)

Un defensor del principio de Leibniz podría argumentar que: “incluso cuando las ondas se fusionan, la mía tiene la propiedad histórica de haber venido de mi extremo [...] [y la otra de otro extremo,] y que esto individualiza las ondas” (Teller 1983, 310); pero el oponente replicará que después de que las ondas se fusionaran no hay algo que las distinga. Y, sin embargo, aún no está

<sup>14</sup> “Una sugerencia recurrente en la literatura es que la falta de individualidad o identificabilidad de los bosones a la que se apela en la explicación habitual de la estadística de Bose tiene que ver con la identidad a través del tiempo” (Van Fraassen 1998, 80).

<sup>15</sup> La relación de ser del mismo espín entre los bosones considerados podemos tratarlo como: “una propiedad irreducible del sistema o bien como una relación no superveniente entre las partes (recordemos que ninguna de estas partículas tiene una dirección de espín determinada)” (Hawley 2006, 302).

claro “cómo debemos entender la noción de «tener una historia» en este contexto: si «tener una historia» implica no sólo viajar a lo largo de alguna trayectoria espacio-temporal, sino también satisfacer la Suposición de Impenetrabilidad, entonces en la interpretación más obvia de esta última en el contexto cuántico, los fotones no tienen «historias»” (French y Krause 2006, 162-3). Considerando que las partículas no estén individuadas por conexiones históricas, y si se supone que el estado mecánico cuántico debe dar una descripción completa, “concluimos que aquí tenemos que ver con verdaderos indiscernibles numéricamente distintos” (Van Fraassen 1998, 81). Aquí se ha de invalidar el PII, porque recordemos que los bosones de un sistema pueden estar en el mismo estado puro al mismo tiempo, resultando irreconocibles en su movimiento.

En cambio, sobre los electrones, en tanto que involucran a los fermiones, se demuestra que son distinguibles con el ejemplo de su dispersión por choques, vistos en el marco del centro de masa. “Antes de la dispersión, las dos partículas son distinguibles, ya que una de ellas se desplaza en una dirección y la otra en otra. [...] Dado que sus historias y velocidades son diferentes, podemos saber qué partícula es cuál y no tenemos ninguna razón para simetrizar la función de onda” (Mirman 1973, 114).

Por otro lado, generalmente, se ha de cuidar el detalle del trato con los estados enredados, puesto que “representar las propiedades relevantes de las partículas en términos de sus estados mixtos [...] depende crucialmente del punto de que los estados puros y los estados mixtos no pueden distinguirse por medio de observaciones realizadas en una sola de las partículas” (French y Krause 2006, 165), de modo que no se pueden atribuir propiedades dependientes del estado o valores definidos a ningún observable a una sola partícula. En este contexto “incluso la forma más débil del Principio, PII(1), falla y el Principio de Identidad de Indiscernibles es directamente falso [...], [porque] no se puede utilizar para garantizar la individuación a través de las propiedades dependientes del estado” (165)<sup>16</sup>.

Además, no olvidemos que del progreso del tratamiento mecánico cuántico, propiamente dicho, de los conjuntos de partículas idénticas (Dirac y Heisenberg, 1926), y del caso general de

---

<sup>16</sup> Quizá el defensor más conocido del principio dentro de la teoría cuántica sea Van Fraassen, mediante su versión de la interpretación modal de la mecánica cuántica: “La idea central es distinguir entre dos tipos de estado: el estado de «valor», que se especifica indicando qué observables tienen valores y cuáles son; y el estado «dinámico», que se especifica indicando cómo se desarrollará el sistema tanto si se aísla como si se actúa sobre él de alguna manera definida” (French y Krause 2006, 8-9).

N partículas y su relación con la teoría de grupos (Wigner, 1927), un elemento central “fue el reconocimiento del requisito de invariancia de permutación para los estados agregados de partículas idénticas” (Van Fraassen 1998, 74). Esta invariancia de permutación se limita a la indistinguibilidad empírica de las partículas. El hecho de que no se cuenten las permutaciones de partículas se entiende en términos de que no haya una medición que podamos realizar para dar lugar a una diferencia discernible entre los estados finales permutados y los iniciales no permutados.

Ante esto último, lo que se propone es el *postulado de indistinguibilidad* (PI)<sup>17</sup>. Este resulta viable según el caso en el que tenemos más de dos partículas y obtenemos tipos de simetría más generales correspondientes a la paraestadística<sup>18</sup>; entonces se impondrá el PI en lugar del *postulado de simetría*, o PS. “Cada uno de estos tipos [de simetría] corresponderá a un vector respectivo del espacio de Hilbert, que será entonces inaccesible a partículas de un tipo de simetría diferente” (French y Krause 2006, 152), mientras que los estados formados por una permutación de partículas que no se cuenten será porque no están disponibles para las partículas del tipo de simetría pertinente, no porque no existan. Una diferencia notable entre el postulado de simetría y el postulado de indistinguibilidad radica en que: “PS expresa una restricción sobre los estados para todos los observables [...]; mientras que PI expresa una restricción sobre los observables, [...] para todos los estados” (147).

En cuanto a la cuestión de si la distinción matemática refleja una diferencia física real, tiene una respuesta negativa en el postulado básico de invariancia de permutación, pues sucede que: “Si  $x$  es el estado de un sistema compuesto de partículas idénticas, el valor de expectativa de cualquier observable  $A$  es el mismo para todas las permutaciones (es decir,  $x$ ,  $Ax = x'$ ,  $Ax'$  para cada observable  $A$ )” (Van Fraassen 1998, 75)<sup>19</sup>.

---

<sup>17</sup> Este postulado permite formas de estadística cuántica diferentes de las estándar (Bose-Einstein y Fermi-Dirac). Y conforme a este sucede que si se aplica una permutación de partículas a cualquier ket para un conjunto de partículas, entonces hay posibilidad de distinguir el ket permutado resultante del original no permutado por cualquier medio de observación en cualquier momento.

<sup>18</sup> La paraestadística es una alternativa hipotética a los modelos estadísticos establecidos en la mecánica cuántica, como lo son la estadística de Bose-Einstein o la estadística de Fermi-Dirac. Se le atribuye a Herbert Sydney Green la creación de la paraestadística en 1953.

<sup>19</sup> Al respecto hay una crítica que menciona: “postular una propiedad sin sentido experimental como la invariancia de permutación para las partículas y luego derivar resultados de ella no parece la mejor manera de entender la situación. Parecería más útil considerar experimentos específicos y ver qué consecuencias observables reales se derivan de la identidad de las propiedades intrínsecas de las partículas y luego preguntarse cómo surgen estos efectos” (Mirman 1973, 115).

Luego, si el teorema de la estadística del espín no se toma en cuenta<sup>20</sup>, parece ser razonable este ejemplo:

Podemos visualizar el sistema como dos partículas idénticas en un estado simétrico que se dispersan elásticamente y pasan a un estado antisimétrico. Esto invalida la creencia de que el carácter de simetría de la función de onda no cambia con el tiempo. La razón es que el Hamiltoniano no es invariante bajo la permutación de las partículas idénticas C y A. Pero, puesto que estas dos partículas no están presentes al mismo tiempo, el requisito de invariancia de permutación es una restricción innecesaria. Incluso si estuvieran presentes al mismo tiempo, no está claro por qué debería exigirse la invariancia de permutación, especialmente si el Hamiltoniano contuviera términos que dieran transiciones de cualquiera de los tres pares (AA, CC, AC) a cualquier otro (Mirman 1973, 117).

En resumen, estos han sido los puntos importantes a tratar sobre nuestra cuestión de la identidad en el uso de la teoría cuántica. Por el momento identificamos que si se renuncia al PII deberíamos admitir bosones elementales entrelazados, así como a los fermiones entrelazados. Mientras rescatamos de los bosones que: “algunas de sus propiedades son aditivas, por lo que es diferente cuántos bosones hay en un sistema dado. Y, como ocurre con los fermiones, los estados de los sistemas entrelazados pueden, en principio, colapsarse para revelar/crear partículas independientes” (Hawley 2006, 302).

## **5.2 El problema conceptual de la identidad en la mecánica cuántica.**

Aquí solo presento dos perspectivas críticas sobre el uso conceptual de la identidad en la mecánica cuántica: la de Simon Saunders (2003) y la de R. Mirman (1973), con el fin de visualizar que el problema de identidad no se queda simplemente en su uso general dentro de la teoría, sino que, la definición del concepto dentro de la teoría cuántica no ha sido lo suficientemente fundamentada. Muy probablemente por la misma situación de que sigue en constante actualización esta rama de la física, y por ello no hemos de recurrir a conclusiones precipitadas.

---

<sup>20</sup> Se vuelve a insistir en algunas deficiencias, pues se comenta que se ha de “comprobar la validez experimental y teórica del teorema de la estadística de espín, que reduce el comportamiento estadístico de un conjunto de partículas a una de sus propiedades intrínsecas, a saber, el espín [...]. si se pudiera demostrar el teorema, se descartarían las estadísticas no estándar; desgraciadamente, no se ha conseguido ninguna prueba satisfactoria” (French y Krause 2006, 200-1).

En primer lugar, Saunders considera parte de lo que ha dejado Leibniz para provecho del tema, pero tomándolo con cuidado dado que los principios que expuso dependían en gran medida de su teoría metafísica de la sustancia, además de que ha cambiado notablemente la lógica desde la época de Leibniz. Comienza señalando que el principio de razón suficiente “promueve claramente el uso de conceptos matemáticos en física. El PII, por el contrario, depende de una distinción tajante entre conceptos *puramente* matemáticos y conceptos físicos” (Saunders 2003, 1). Así mismo, marca que se ha de referir a objetos en el sentido lógico: “como objetos de predicación. Sugiero que es *hablando* de objetos, a la luz de las teorías y experimentos matemáticos, como logramos una interpretación clara de estas teorías y experimentos en términos de objetos físicos -sugiero que nuestra comprensión de qué objetos existen es más clara en nuestro uso de oraciones declarativas simples” (2).

Siguiendo este camino, según Saunders, la primera preocupación es la sintaxis, por lo que para los símbolos no lógicos del lenguaje considera sólo lenguajes finitos de primer orden que podrían derivarse de la teoría física, y se han de interpretar:

en términos de funciones, propiedades y relaciones físicas reales. Nuestra guía aquí, como para Leibniz, reside en las magnitudes mensurables. [...] [He igual señala que desde] un punto de vista formal, las matemáticas utilizadas en física están muy lejos de la teoría de conjuntos, y aún más de la lógica formal: el signo de identidad, tal y como aparece en las teorías físicas existentes, sólo significa la igualdad o identidad de expresiones matemáticas, no de objetos físicos (Saunders 2003, 2)<sup>21</sup>.

Hasta aquí introduzco parte de la discusión de Saunders, lo que continúa de la misma se mantiene en orden del uso del lenguaje.

Ahora, respecto a la postura de Mirman, esta se mantiene anclada en el vínculo entre la necesidad de tener en cuenta la investigación por medio de los experimentos, con los problemas conceptuales que dificultan la interpretación teórica de los experimentos. Cito:

El concepto de partículas idénticas y los requisitos relacionados con el carácter de simetría de la función de onda de muchas partículas se aceptan como parte de las convenciones básicas de la mecánica cuántica, y tienden a utilizarse sin ningún análisis de su significado experimental o de su

---

<sup>21</sup> En el caso de los modelos difeomórficos del espaciotiempo (es decir, aquellos que) en la Teoría general de la relatividad, esta tesis se ha denominado “equivalencia de Leibniz”. Pero la tesis es bastante general, pues se aplica por igual a cualquier simetría de una teoría física.

relación con otros postulados de la mecánica cuántica. Creemos que tal análisis es necesario, porque [...] estos conceptos han sido mal formulados, mal relacionados con los resultados experimentales que los motivan, y a menudo se enuncian de forma que carecen de sentido experimental (e incluso semántico) (Mirman 1973, 110).

A esto Mirman añade lo siguiente: “podemos describir el estado escribiendo una función de onda cuyo valor absoluto es invariante bajo la operación matemática de intercambiar índices, pero [...] la situación física (no la función de onda) no cambia si se intercambian las partículas (no los índices)” (Mirman 1973, 113). Cuando en realidad se espera que al intercambiar físicamente dos partículas, aun siendo bastante idénticas, se note un efecto sobre la situación física. Entonces, aquí el término “intercambio” parece que carece de significado físico. Y se vuelve evidente que “no tiene sentido exigir que la función de onda se comporte de una determinada manera bajo el intercambio de las partículas 1 y 2, porque la identidad de la partícula nos impide asignar cualquier significado físico a los índices” (113).

De esto se plantea que no es impuesto por los resultados experimentales, “sino que se deriva de la conmutatividad de la lengua inglesa. [...] [Afirmándose que es,] de hecho, bastante típica de las afirmaciones de los requisitos que se siguen de la identidad, y el defecto en ella es también bastante común” (Mirman 1973, 113), de modo que variantes de estas afirmaciones mantienen el mismo problema de carecer de sentido por la redundancia de sus términos.

### **5.3 La importancia del experimento.**

Aquí expongo con un poco más de detalle lo que expone Mirman (1973) de manera que se pueda ver una pequeña parte de lo que puede ofrecer enfocar el problema de la identidad desde el ámbito experimental de la teoría cuántica. Ante esto quiero enfatizar que esta perspectiva se propone porque se ha señalado el peligro de utilizar afirmaciones no definidas experimentalmente, las cuales se pueden utilizar como base para las pruebas y entonces llevaría a resultados que difícilmente se consideraran fiables. Pasemos desde una perspectiva teórica para vincularla con una perspectiva que aboga por el experimento para poder definir lo que se entiende por identidad en mecánica cuántica.

Tomemos el caso de dos electrones en un átomo. Se sabe que, con salvedades, no podemos estar seguros de que, por ejemplo, después de la dispersión de una partícula estudiada la volveremos a enfocar como la partícula objetivo. Es decir, “[las] partículas no pueden ser



seguidas a través del proceso de dispersión [...]. Es en este sentido que los conceptos de partículas idénticas, indistinguibilidad y simetrización empiezan a tener significado” (Mirman 1973, 118). Luego, si encontramos una partícula dispersada a través de un ángulo pequeño, podríamos estar bastante seguros de que es la partícula objetivo, así que, aunque no podamos seguir la partícula a través del proceso de dispersión, “las partículas no siempre son completamente indistinguibles” (118). Mientras que, por otro lado, decimos que la amplitud de dispersión tiene una discontinuidad cuando las partículas son idénticas; pero si se dispersan entre sí dos partículas casi idénticas, excepto por una masa ligeramente diferente, entonces, “la amplitud viene dada por la fórmula del seno al cuadrado inverso, pero si la diferencia de masa es cero, viene dada por una fórmula diferente. Esto es completamente artificial y no lo exige el experimento” (118). Aparte, hay casos particulares en los que se discute que el tratamiento teórico es el mismo para partículas idénticas y no idénticas: “en sus resultados hay un parámetro (por ejemplo la diferencia de masa) y los resultados habituales para partículas idénticas se obtienen tomando un valor particular de este parámetro” (119).

Ahora. ¿Qué dice el experimento sobre la dispersión de dos partículas idénticas? Dice que “la sección transversal viene dada por la suma de los cuadrados de las amplitudes de dispersión, más un término de interferencia” (Mirman 1973, 118), sin embargo, este término de interferencia<sup>22</sup> (que es resultado de considerar la superposición para calcular las probabilidades de estados, apareciendo un término cruzado) no se toma en cuenta para la dispersión de partículas distintas. Pero aún “hay casos en los que el término de interferencia está presente incluso si [...] [dos partículas] son diferentes, por ejemplo si sólo difieren en sus masas, y eso ligeramente, y son inestables. Diferente no siempre significa ortogonal” (119).

Según el método de Vladimir Lvovich Lyuboshitz y de M. I. Podgoretskiĭ (1971)<sup>23</sup>:

Encuentran un término de interferencia que depende de  $\exp [i(E_B - E_A)t]$ , donde las  $E$  son las energías de las dos partículas y  $t: t_1 - t_2$ , que son los tiempos a los que los dos detectores detectan las partículas. Así, por ejemplo, obtienen interferencias aunque las partículas tienen masas diferentes.

En particular, si el tiempo de retardo es corto comparado con el periodo correspondiente a la

<sup>22</sup> Considere la interferencia como el hecho de que las partículas subatómicas al tener un comportamiento ondulatorio se combinan. Pueden ser de la misma fuente, estar correlacionadas o no.

<sup>23</sup> Lyuboshitz, V. y M. Podgoretskiĭ. 1971. “The Question of the Identity of Elementary Particles”. *Sov. Phys. JETP* 33: 5-10.

diferencia de energía, las partículas tienden a comportarse como si fueran idénticas (Mirman 1973, 120)<sup>24</sup>.

En cuanto a las consecuencias experimentales de la antisimetría y a la respuesta de la pregunta: ¿cómo la interacción produce estas consecuencias? La consecuencia que se considera aquí es el principio de exclusión. Consideremos: “un electrón se dispersa desde un ion a un estado ligado (el átomo). ¿Cuál es la sección transversal para dos electrones que pasan al mismo estado? Es la suma de los cuadrados de las amplitudes, más el término negativo de interferencia. Y el término de interferencia anula los otros dos, por lo que el resultado es cero” (Mirman 1973, 121). Mientras que, si las partículas tienen masas ligeramente diferentes, “¿cuál es la probabilidad de detectar dos partículas en el mismo estado? En un período de tiempo corto, el término de interferencia es igual a cero, por lo que la sección transversal es distinta de cero” (121). Entonces, el principio de exclusión se deduce por la presencia del término de interferencia en el proceso de dispersión que forma el átomo.

Bien se ha señalado que en la dispersión está la presencia del término de interferencia<sup>25</sup>, y hay situaciones con resultados que se siguen de la presencia de interferencia, como lo es el principio de exclusión. “Estos son conceptos bien definidos y los resultados experimentales y todo el simbolismo teórico debe estar de acuerdo con ellos” (Mirman 1973, 119).

Así pues, se concluye en el texto de Mirman que “las partículas son indistinguibles porque no intentamos distinguirlas y esta indiferencia permite que la sección transversal tenga la forma que tiene, incluida la presencia del término de interferencia” (Mirman 1973, 121). Y por otro lado, también hemos de conservar que sin duda, ha resultado radical el buscar una homogeneidad o totalidad en el plano de la mecánica cuántica junto al desafío de “la idea arraigada de que lo distinguible es separable o está separado” (Van Fraassen 1998, 90). Mantenemos el discernimiento entre toda una gama de opciones, algunas más útiles que otras.

## **6. Análisis. El principio de identidad de los indiscernibles (PII) y la interpretación relacional de la mecánica cuántica (MCR).**

---

<sup>24</sup> Este análisis se señala como válido si es que la diferencia de energía se debe a causas distintas de una diferencia de masa, por ejemplo, si son diferentes proyecciones de espín en un campo magnético.

<sup>25</sup> Al respecto menciono que si es que siguiéramos a las partículas: “estaríamos cambiando aleatoriamente la fase relativa y destruyendo así el término de interferencia” (Mirman 1973, 120).

Aquí nuestra cuestión es: ¿Qué podemos conservar del PII que sea aplicable en la interpretación relacional de la mecánica cuántica? Para entender nuestra respuesta a esta pregunta, será pertinente mencionar y recordar algunas características de la interpretación relacional que ha propuesto Carlo Rovelli, esto con el fin de poder ir visualizando su posición con respecto al principio de identidad de los indiscernibles.

Bien, tomemos en cuenta lo que se ha expuesto en la sección II. A manera de resumen se puede resaltar de esta interpretación que: la relación entre el sistema observador y el sistema estudiado es lo que le da forma a la misma interpretación, porque la información que se toma de los hechos cuánticos siempre dependerá de esta relación (las propiedades de los sucesos no existen en todo momento), así que, aquí se tomará cierta postura de modo que en el estudio de algún sistema cuántico se resalte la relevancia de la información en constante actualización. Y además, he de señalar que dentro de esta interpretación no se aboga por un *realismo* fuerte, el cual supone que “es en principio posible enumerar todas las características del mundo, todos los valores de todas las variables que lo describen en algún nivel fundamental, en cada momento de tiempo continuo” (Rovelli 2018, 9). Permitir este realismo significa esquivar el teorema de Kochen-Specker (1967), cuyos resultados confirman que si todas las variables pudieran tener un valor simultáneamente, entonces, se invalidarían las predicciones de la mecánica cuántica. En general, este teorema establece que:

[...] no hay una asignación consistente de valores definidos a todas las variables, al restringir el conjunto de variables elementales que describen el mundo (al estado cuántico en sí mismo, o a las trayectorias de Bohm, o a cualquier otra cosa). La mecánica cuántica relacional asume seriamente el teorema de Kochen-Specker: las variables adquieren valor solo en las interacciones. [...] Ni siquiera se realiza en el sentido relativamente más débil de considerar una yuxtaposición de todos los valores posibles en relación con todos los sistemas posibles (Rovelli 2018, 9).

Entonces, algo debe determinar cuándo una variable tiene un valor. Lo común es que en los libros de texto se mencione que se determina “cuando lo medimos”, pero a “la Naturaleza no le importa si tú o yo estamos «midiendo» algo. La medición es una interacción como cualquier otra. Las variables adquieren valor en cualquier interacción” (Rovelli 2018, 5).

Debido a esto, la pregunta: ¿qué sucede entre eventos cuánticos?, carece de importancia en la interpretación relacional. Lo que se tiene presente es que: “El acontecer del mundo es un

enjambre de eventos cuánticos de grano muy fino pero discreto, no la permanencia de entidades que tienen propiedades bien definidas en cada momento de un tiempo continuo” (Rovelli 2018, 9).

Por lo que llevamos, tomando en cuenta todo el conjunto de estas notas, me gustaría mencionar que el PII (1) que vimos al inicio de la sección IV (el cual menciona que no es posible que más de un individuo posean todas las propiedades y relaciones en común), dentro de esta interpretación no adquiere mayor o menor relevancia que en lo expuesto en la sección mencionada, es decir, conforme a esa “clasificación”, para poder visualizar una noción de identidad, podemos apoyarnos en esta sección y aclarar cuál es la importancia del concepto de identidad dentro del marco teórico de Rovelli. Ya que, por lo que acabo de explicar arriba, no es posible que la interpretación relacional sea cien por ciento compatible con el original principio de identidad de los indiscernibles de G. W. Leibniz, principio que mantuvo arraigado un realismo fuerte.

Luego, es claro que Rovelli mantiene cierta discreción ante posibilidades que rebasen lo que hasta ahora es conocido y evaluado dentro de la física, así que tiene sentido el que afirme que es “peligroso para un físico describir la naturaleza en términos de abstracciones idealizadas demasiado alejadas de la evidencia de la observación real” (Rovelli 2018, 3). Entonces, el camino que hemos de tomar es el de identificar la noción de identidad que se adapte conforme a los hechos que se han estudiado; siendo así, se está de acuerdo con lo que hemos revisado en la primera parte de la sección IV, acerca de lo que se explicó en relación al principio de Pauli, la superposición cuántica y estados enredados, especialmente en cuanto a la dinámica de los bosones.

El aspecto que se ha de evaluar con algo más de detalle en esta sección es el de la noción de que las partículas tengan una historia, como se vinculó en la sección IV. Para ello quiero recordar que la MCR le da peso ontológico a la información, la cual está en constante actualización durante el estudio de los sucesos cuánticos; entonces, conforme a esto se señala que la MCR basa su interpretación de la teoría cuántica en un conjunto amplio de hechos, los llamados hechos relativos, de los cuales los hechos estables son un subconjunto. Esto es importante para poder reconocer cómo es que la identidad toma un papel dentro de esta interpretación, y no exactamente de la manera en que el tradicional PII lo propone.

Para presentar a los hechos estables y a los relativos haré uso de algunos ejemplos propuestos por Carlo Rovelli y Andrea Di Biagio en su texto *Stable facts and relative facts*, pero siempre hemos de tener presente que sean del tipo que sean los hechos, estos siempre son de acuerdo a la relación entre sistemas, tal y como ha sustentado su interpretación el físico Carlo Rovelli. Comienzo con los hechos relativos: estos no pueden tomarse como condicionales para calcular probabilidades de hechos relativos a un sistema diferente, “porque lo que es un hecho en un contexto determinado no lo es necesariamente en otros contextos” (Di Biagio y Rovelli 2021, 10). Así que la ecuación siguiente sólo es válida si, por ejemplo, los valores “ $b$  y  $a_i$  son hechos relativos al mismo sistema, pero falla en general si se utiliza para hechos relativos a sistemas diferentes” (3).

$$P(b) = \sum_i P(b|a_i)P(a_i)$$

Luego, propongamos la relación de un sistema  $F$  con otro, llamémosle  $\mathcal{E}$ , que represente el entorno, y añadamos otro  $W$  que sea el observador y que solo pueda relacionarse con  $F$ . En esta relación sucede que un hecho relativo “sobre un sistema  $F$  es estable para un sistema  $W$  si  $W$  no tiene acceso a un sistema  $\mathcal{E}$  que esté suficientemente enredado con  $F$ . La estabilidad es sólo aproximada y relacional. Aproximada, porque ningún hecho es exactamente estable para cualquier sistema finito. Relacional, porque depende de cómo el sistema putativo «observador» se acopla al sistema y al entorno” (Di Biagio y Rovelli 2021, 6).

Ahora. ¿Qué da lugar a los hechos estables? Al respecto se toma en cuenta a la decoherencia como parte del motivo. Muchos trabajos teóricos han demostrado que es prácticamente inevitable y efectiva al intervenir en un gran número de grados de libertad<sup>26</sup>, así mismo, la decoherencia “aclara por qué una gran clase de hechos relativos son estables para nosotros y forman así el mundo clásico estable en el que vivimos” (Di Biagio y Rovelli 2021, 10), porque sugiere que el estado de un sistema cuántico entrelazado evoluciona por interacción con el entorno hacia una superposición no entrelazada de estados clásicos, es decir, se pierde la superposición cuántica en el mundo macroscópico. Es conveniente señalar dos aspectos sutiles de

---

<sup>26</sup> La decoherencia ha desempeñado un papel en los debates sobre el problema de la medición. Pero necesita una ontología. Por un lado, se trata de un fenómeno físico relevante sobre la medición cuántica; y por otro lado, hay consenso en que la decoherencia por sí sola no es una solución al problema de la medición, porque no es suficiente para establecer un vínculo entre la teoría y la realidad.

la decoherencia. En primer lugar, Rovelli afirma que la decoherencia no es un fenómeno absoluto, sino relacional. Es decir, de manera similar a la primera ecuación, ahora tomando el ejemplo anterior y añadiendo que: (a)  $\epsilon$  es muy pequeño y (b) un sistema  $W$  que no interactúa con  $\mathcal{E}$ ; podemos señalar que “depende de cómo interactúe el tercer sistema  $W$  con el sistema combinado  $F - \mathcal{E}$ . Esto se debe a que la hipótesis (b) [...] es tan crucial como la hipótesis (a) para deducir [...] [la siguiente ecuación]. Otro sistema  $W$  que interactúe de forma diferente con  $F - \mathcal{E}$  podría detectar efectos de interferencia” (5).

$$P(b^{(W)}) = \sum_i P(Fa_i^{(\epsilon)})P(Fa_i^{(\epsilon)}) + O(\epsilon)$$

Aquí, las variables de  $F$  que se decoherencian vienen determinadas por las interacciones físicas entre  $F$  y  $\mathcal{E}$  (son aquellas variables que conmutan con el Hamiltoniano de interacción). El observador puede aplicar la ecuación (3), los hechos estables la satisfacen porque la interacción con los grados de libertad inaccesibles suprime en gran medida los términos de interferencia.

$$P(b^{(W)}) = \sum_i P(b^{(W)}|a_i^{(F)})P(a_i^{(F)}). \quad (3)$$

En segundo lugar, [...] [utilizando el ejemplo anterior,] un hecho estable para  $W$  no es necesariamente un hecho relativo a  $W$ . Es decir, la variable  $L_F$  es estable para  $W$  aunque este último no haya interactuado con ella, por lo que todavía no hay un hecho relativo a  $W$ . Esto es lo que permite decir que, con respecto a  $W$ , el «estado del sistema  $F$  ha colapsado en el estado  $|Fa_i\rangle$  con probabilidad  $P(Fa_i) = |c_i|^2$ , » aunque  $W$  no haya interactuado con  $F$  (Di Biagio y Rovelli 2021, 5).

Hasta aquí ambos puntos demuestran que la decoherencia no implica que exista un mundo de hechos absolutos, aunque sí explica por qué y en qué momento se razona en términos de hechos estables (que son aproximadamente clásicos), y su diferencia con los hechos relativos.

En cuanto al hecho de la medición vinculado a lo que se acaba de explicar, de manera concisa podemos mencionar lo siguiente. Por ejemplo: que dos sistemas,  $S$  y  $F$ , hayan interactuado de modo que sus variables  $L_S$  y  $L_F$  se entrelazaron; el observador puede decir “«se ha medido  $L_S$ » y suponer que el puntero del aparato se ha movido en un sentido o en otro. En el formalismo matemático,  $W$  puede suponer que «la función de onda de  $S$  se ha colapsado».

Nótese, sin embargo, que ni el valor de  $L_S$  ni el de  $L_F$  son un hecho para  $W$  en esta etapa. La estabilidad simplemente permite a  $W$  «etiquetar» hechos relativos a  $F$ ” (Di Biagio y Rovelli 2021, 6).

En resumen, podemos distinguir dos nociones de hechos que desempeñan un papel en la mecánica cuántica relacional: los hechos relativos y los hechos estables. Reconocemos que los hechos relativos corresponden a hechos reales y, por tanto, tienen consecuencias empíricas universales; esto porque la teoría cuántica “nos permite hablar de hechos relativos y calcular probabilidades para ellos. La [siguiente ecuación] [...] se cumple, pero (3) no. El quebrantamiento de (3) es la interferencia cuántica” (Di Biagio y Rovelli 2021, 6).

$$P(b^{(\mathcal{F})}) = \sum_i P(b^{(\mathcal{F})}|a_i^{(\mathcal{F})})P(a_i^{(\mathcal{F})})$$

Con esto busco resaltar la complejidad de la dinámica cuántica en relación a la precisión de las medidas y, por tanto, su vinculación con una noción de identidad a un nivel microscópico. Y aunque no en todo contexto cuántico se salve alguna noción de identidad, sin embargo, en la mecánica cuántica relacional notamos que a través de su distinción entre hechos relativos y hechos estables se puede reconocer una nueva forma de entender la identidad en relación con la interacción entre sistemas, esto junto al punto de que la decoherencia cuántica nos muestra cómo ciertos hechos se mantienen estables debido a su papel en el entorno. Lo que puede formalizar la vinculación entre el PII con lo que propone la decoherencia cuántica, ya que esta forma parte de lo que hace posible el PII a nivel macroscópico.

Entonces, de modo que hemos de aplicar en la mecánica cuántica una noción diferente de identidad, o al menos dentro de la interpretación de la mecánica cuántica relacional, probablemente el primer paso sea visualizar la riqueza del conocimiento que ha proporcionado la mecánica cuántica y tomar el consejo de Rovelli: “no deberíamos seguir haciendo una y otra vez lo que equivale a la misma pregunta: tratar de llenar la ontología escasa de la Naturaleza con nuestra intuición clásica sobre la continuidad” (Rovelli 2018, 10), en su lugar se podría acoger el conocimiento que se ha estado engendrando respecto a la estructura del mundo para poder afinar y moldear nuestros conceptos, así que, no sería que “nuestra orientación filosófica [completa]

determine nuestra lectura de la mecánica cuántica, debemos estar dispuestos a dejar que los descubrimientos de la física fundamental influyan en nuestras orientaciones filosóficas” (11).

## **7. Conclusiones.**

Por un lado, el principio de identidad de los indiscernibles propuesto por Leibniz plantea que dos cosas no pueden existir en el mismo tiempo y lugar, ni compartir con exactitud todas sus propiedades. Este principio aunado a la organización de lo existente, nos lleva a reflexionar sobre la naturaleza de la identidad en la mecánica cuántica. Siendo que, por otro lado, en la mecánica cuántica, incluyendo su interpretación relacional que vimos en este texto, la noción de identidad se ve desafiada por la distinción entre partículas idénticas, la exclusión de ocupación de estados, las superposiciones cuánticas y los estados entrelazados. En general, se presentan conflictos con el principio de identidad de Leibniz al considerar la dinámica de las partículas subatómicas, en especial la de los bosones. Recordemos lo que Saunders afirma respecto a los fotones, siendo que estos no pueden ser considerados objetos y, por tanto, no tienen identidad. Sin embargo, tiene identidad su relación que conforma la luz. Esto plantea la necesidad de una nueva forma de entender la identidad en el contexto cuántico.

En conclusión, el principio de identidad de los indiscernibles y su relación con la interpretación relacional de la mecánica cuántica (y en general con la mecánica cuántica) presenta un desafío importante en la interpretación de la teoría, ya que nuestra noción clásica de identidad se arraigó únicamente a nuestro contexto macroscópico. Pero hemos podido rescatar que esta interpretación destaca la importancia de los hechos relativos y estables, así como la influencia de la decoherencia en la definición de identidad en su marco teórico. Con ello nos ofrece herramientas para abordar la cuestión sobre cómo entender la identidad a nivel subatómico, aunque no quede libre de todas las objeciones que se han presentado respecto a la situación cuántica.

Por el momento, también he de añadir que dentro de la interpretación relacional de la mecánica cuántica no existe un conflicto “directo” con la noción de identidad, pues ha sido bastante práctica para no colocar esta característica como una traba para el desarrollo de la misma interpretación, sin embargo, se reconoce que, al igual que la mecánica cuántica en general, no cuenta con un concepto claro de identidad.



En definitiva, la mecánica cuántica relacional nos invita a replantear y adaptar nuestra concepción de identidad a la luz de los avances teóricos y empíricos de la física cuántica, conforme a los que nos anima a dejar que influyan en la revisión de nuestras concepciones filosóficas. Así, con los nuevos conocimientos nos volvemos más conscientes de la función de elementos de nuestro entorno y nos adaptamos al mismo, junto con la modificación responsable de nuestras ideas.

### **Referencias.**

- Copleston, Frederick. 1996. “Capítulo XVI. Leibniz II”. En *Historia de la filosofía. Vol. IV*, editado por Manuel Sacristán, 257-276. Barcelona: Editorial Ariel.
- Di Biagio, Andrea, and Carlo Rovelli. 2021. “Stable Facts, Relative Facts”. *Foundations of Physics* 51 (30): 1-13. doi: 10.1007/s10701-021-00429-w.
- French, Steven and Décio Krause. 2006. “Chapter 2. Individuality in Classical Physics”. In *Identity in Physics. A Historical, Philosophical and Formal Analysis*, 23-84. New York: Oxford University Press.
- French, Steven and Décio Krause. 2006. “Chapter 4. Individuality and Non-Individuality in Quantum Mechanics”. In *Identity in Physics. A Historical, Philosophical and Formal Analysis*, 143-202. New York: Oxford University Press.
- Hawley, Katherine. 2006. “Weak discernibility”. *Analysis* 66 (4): 300–303. doi: 10.1093/analys/66.4.300.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm. 1983. “Libro II. Capítulo XXVII”. En *Nuevos ensayos sobre el entendimiento humano*. Madrid: Editora Nacional.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm. 1982. “Verdades primeras”. En *G. W. Leibniz. Escritos filosóficos*, editado por Ezequiel de Olaso, 339-345. Buenos Aires: Editorial Charcas.
- Martin-Dussaud, Pierre, Carlo Rovelli, y Federico Zalamea. 2019. “The notion of locality in relational quantum mechanics”. *Foundations of Physics* 49 (2): 1-6. doi: 10.48550/arXiv.1806.08150.

- Mirman, R. 1973. “Experimental meaning of the concept of identical particles”. *Il Nuovo Cimento* 18 (1): 110-122. doi: 10.1007/BF02832643.
- Myrvold, Wayne C. 2022. “Chapter 2. Philosophical Issues Raised by Quantum Theory and its Interpretations”. In *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*, edited by Olival Freire, 23-84. United Kingdom: Oxford University Press.
- Pereyra Padilla, Pedro. 2011. *Fundamentos de física cuántica*. México: Editorial Reverté.
- Rada, Eloy. 1980. *La polémica Leibniz-Clarke*. España: Taurus.
- Rovelli, Carlo. 1996. “Relational quantum mechanics”. *International Journal of Theoretical Physics* 35: 1637–1678. doi: 10.1007/BF02302261
- Rovelli, Carlo. 2022. “Chapter 43. The Relational Interpretation”. In *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations*, edited by Olival Freire. United Kingdom: Oxford University Press.
- Rovelli, Carlo. 2018. “Space is blue and birds fly through it”. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 5: 1-13. doi: 10.1098/rsta.2017.0312.
- Saunders, Samuel. 2003. “Physics and Leibniz’s Principles”. *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, 1-19. doi: 10.1017/CBO9780511535369.017.
- Teller, Paul. 1983. “Quantum Physics, the Identity of Indiscernibles, and Some Unanswered Questions”. *Philosophy of Science* 50 (2): 309–319. doi: 10.1086/289112.
- Van Fraassen, Bas C. 1998. “The Problem of Indistinguishable Particles”. In *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, edited by Elena Castellani, 73-92. USA: Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv173f1xr>.
- Zettili, Nouredine. 2001. *Quantum mechanics: concepts and applications*. USA: Wiley.