



Matias Daniel Pasqualini

matiaspasqualini@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0084-1363>

Universidad Nacional de Rosario.

CONICET-Instituto de Investigaciones “Dr. Adolfo Prieto”.

Artículo recibido: 22 de mayo de 2023

Artículo aceptado: 02 de junio de 2023

Artículo publicado: 31 de julio de 2023



[CC BY, Matias Daniel Pasqualini, 2023]

Artículo de Investigación

<https://doi.org/10.35588/cc.v4i1.6151>

Una Ontología Modal de Relaciones Para la Mecánica Cuántica

A modal ontology of relations for quantum mechanics

Resumen

En correspondencia con las interpretaciones modales de la mecánica cuántica, Lombardi y Castagnino (2008) y da Costa, Lombardi y Lastiri (2013) han propuesto para dicha teoría una ontología de haces de propiedades posibles intrínsecas, centrada principalmente en las cuestiones de la contextualidad e indistinguibilidad cuánticas. En correspondencia con la interpretación conocida como “mecánica cuántica relacional” (Rovelli, 1996), se han propuesto dos ontologías basadas en relaciones. Laura Candiotta (2017) aboga por una metafísica de relaciones radical, considerada por la autora como una instancia del llamado “realismo estructural óptico”. Alternativamente, Andrea Oldofredi (2021) propone una ontología de haces de relaciones, considerada por el autor como una instancia del llamado “realismo estructural moderado”. Desde la década de 1980, el tema del entrelazamiento cuántico ha llevado a varios autores (Teller, Healey, Howard, Esfeld) a defender que la mecánica cuántica comporta una forma de holismo. Se ha defendido que el holismo de la mecánica cuántica da apoyo a la tesis metafísica conocida como “monismo de prioridad” (Schaffer, 2010a). En este artículo, se propone una ontología de la mecánica cuántica en la que las propiedades de los sistemas cuánticos revisten a la vez carácter modal y relacional. Como resultado, se obtiene una ontología de la mecánica cuántica holista que representa una instancia del monismo de prioridad y del realismo estructural moderado.

Palabras clave: Holismo cuántico; Monismo de prioridad; Ontología de propiedades; Realismo estructural moderado; Realismo estructural óptico.

Abstract

In correspondence with the modal interpretations of quantum mechanics, Lombardi and Castagnino (2008) and da Costa, Lombardi and Lastiri (2013) have proposed an ontology of bundles of possible intrinsic properties for quantum mechanics, focused mainly on the issues of quantum contextuality and indistinguishability. Corresponding to the interpretation known as “relational quantum mechanics” (Rovelli, 1996), two ontologies based on relations have been proposed. Laura Candiotta (2017) advocates for a radical metaphysics of relations, considered by the author as an instance of the so-called “ontic structural realism”. Alternatively, Andrea Oldofredi (2021) proposes an ontology of bundles of relations, considered by the author as an instance of the so-called “moderate structural realism”. Since the 1980s, the topic of quantum entanglement has led several authors (Teller, Healey, Howard, Esfeld) to defend that quantum mechanics involves a form of holism. It has been argued that the holism of quantum mechanics supports the metaphysical thesis known as “priority monism” (Schaffer, 2010a). In this article, an ontology of quantum mechanics is proposed in which the properties of quantum systems have both a modal and a relational character. As a result, a holistic ontology of quantum mechanics is obtained, which is an instance of priority monism and moderate structural realism.

Keywords: Moderate Structural Realism; Ontic Structural Realism; Ontology of properties; Priority Monism; Quantum holism; Quantum entanglement.

Introducción

La propuesta conocida como “ontología de haces de propiedades posibles” (Lombardi y Castagnino, 2008; da Costa, Lombardi y Lastiri, 2013), asociada a las interpretaciones modales de la mecánica cuántica, se ocupa principalmente de los desafíos que la contextualidad e indistinguibilidad cuánticas imponen a la elucidación de la ontología de la mecánica cuántica. Dado que en dicha propuesta las propiedades son concebidas como fundamentalmente intrínsecas, esta ontología de la mecánica cuántica no tiene en cuenta de modo directo a las características de la mecánica cuántica que parecen indicar que las propiedades de los sistemas cuánticos son relaciones inherentes, en un sentido que se corresponde con una forma u otra de holismo cuántico (Teller, 1986; Howard, 1989; Healey 1991). Alternativamente, existen propuestas para la ontología de la mecánica cuántica asociadas con la interpretación conocida como “mecánica cuántica relacional” (RQM por sus siglas en inglés; ver Rovelli, 1996), en las que se admite que (al menos algunas) propiedades de los sistemas cuánticos son relaciones inherentes. Una de estas propuestas, que se debe a Andrea Oldofredi (2021), utiliza una teoría de haces de propiedades para dar cuenta de los sistemas cuánticos. Dicha propuesta es entendida por su autor como una instancia del llamado “realismo estructural moderado”. La otra propuesta, que se debe a Laura Candiotta (2017), rechaza que los sistemas cuánticos puedan ser entendidos como objetos en cualquier sentido (ni siquiera como haces de propiedades) y defiende una forma de realismo estructural radical.

En este artículo pretendemos reformular en términos relacionales a la ontología de haces de propiedades posibles asociada con las interpretaciones modales. La propuesta pretende combinar el carácter relacional y modal de las propiedades de los sistemas cuánticos, de manera que se obtenga una ontología holista que resulte una instancia del llamado “monismo de prioridad” (ver Schaffer, 2018). De este modo, dispondríamos de una ontología compatible con las interpretaciones modales que aborde directamente el problema de la contextualidad cuántica (como la ontología ya disponible de los haces de propiedades posibles intrínsecas) pero, al mismo tiempo, también podría dar cuenta directamente de las características relacionales y holísticas de la mecánica cuántica.

Para lograr este objetivo, argumentamos, siguiendo una propuesta de Esfeld (2004), que es posible establecer una equivalencia entre las propiedades intrínsecas de un sistema total y las propiedades relacionales inherentes de sus subsistemas. Así, mientras al sistema total, que podría representar razonablemente al universo si se hacen ciertas suposiciones, le corresponde un haz de propiedades intrínsecas, a los subsistemas, que podrían representar no solo sistemas físicos a escala microscópica sino también objetos ordinarios, les corresponden haces de relaciones inherentes. La existencia de relaciones inherentes entre subsistemas sería suficiente, junto con ciertos supuestos lógicos y mereológicos muy fundamentales, para que de ella se infiera el monismo de prioridad, tal como Schaffer (2010b) argumenta. Dado que en esta propuesta no hay “*relations all the way down*” (eslogan del realismo estructural radical), sino que las relaciones se agregan para constituir haces de relaciones, nuestra propuesta resultaría una instancia del realismo estructural moderado, siguiendo el espíritu de la propuesta de Oldofredi.

En la primera sección presentamos brevemente a las interpretaciones modales y a la ontología de haces de propiedades intrínsecas posibles asociada con ellas. En la segunda sección, presentamos la interpretación RQM y las propuestas de Oldofredi y Candiotta. En la tercera sección, describimos

las características relacionales y holistas que tiene la mecánica cuántica a causa del fenómeno del entrelazamiento cuántico. En la cuarta sección, encontramos el núcleo de la propuesta de una ontología modal de relaciones para la mecánica cuántica. En las secciones quinta y sexta, se defiende que dicha propuesta resulta tanto una instancia del monismo de prioridad como del realismo estructural moderado. Las secciones 7 a 9 son corolarios destinados a profundizar en algunos aspectos de la presente propuesta de ontología.

1. Interpretaciones Modales y la Ontología de Haces de Propiedades Posibles Intrínsecas

Mencionemos brevemente las principales características de las interpretaciones modales. Estas distinguen entre un estado-dinámico y un estado-valor. El estado-dinámico determina cuáles son las propiedades posibles de un sistema cuántico y asigna una probabilidad a cada una de ellas. El estado-valor determina cuáles son las propiedades actuales de un sistema, es decir, cuáles son los valores definidos que adquiere un cierto conjunto de observables compatibles. El llamado “vínculo autoestado-autovalor” (EEL por sus siglas en inglés) se rechaza parcialmente en el sentido de que se admite que un sistema puede tener propiedades actuales respecto a cierto observable, aunque el sistema no se encuentre en un autoestado de dicho observable. Cada interpretación modal en particular está equipada con una regla de actualización específica que fija cuál es el estado-valor en un momento dado. El propósito de estas interpretaciones es resolver el problema de la medición reduciendo las interacciones de medición a interacciones ordinarias. Para ello, las interpretaciones modales proponen que los sistemas cuánticos tienen valores definidos para uno de sus contextos con independencia de si el sistema en cuestión está siendo objeto de una medición. El llamado “postulado de proyección” característico de la interpretación ortodoxa se rechaza y, en consecuencia, los sistemas cuánticos evolucionan siempre unitariamente. Como ejemplos de interpretaciones modales, mencionamos a la BDMI (Kochen, 1985; Dieks 1988, 1989), la SDMI (Vermaas y Dieks, 1995), la PMI (Bene y Dieks, 2002) y la MHI (Lombardi y Castagnino, 2008).¹

En correspondencia con esta familia de interpretaciones, Lombardi y Castagnino (2008) y da Costa, Lombardi y Lastiri (2013) han propuesto una ontología de haces de propiedades posibles intrínsecas (OPP de ahora en adelante). Los postulados principales de esta ontología son:

- (1) Los observables físicos, representados matemáticamente por operadores autoadjuntos en el espacio de Hilbert, son en el dominio ontológico *instancias de propiedades-tipo universales*. Por ejemplo, el operador O se corresponde con la propiedad-tipo universal $[O]$ con instancias $[O^i]$.
- (2) Los valores físicos, representados matemáticamente por los autovalores de los operadores autoadjuntos, son en el dominio ontológico *propiedades-caso posibles*. Por ejemplo, a cierta instancia de propiedad tipo $[O^i]$ le corresponden las propiedades-caso $[o_j^i]$ si es que $O^i |o_j^i\rangle = o_j^i |o_j^i\rangle$.

¹ Para un resumen sobre interpretaciones modales, consultar Lombardi y Dieks, 2021.

(3) Los sistemas físicos, representados matemáticamente por un álgebra de operadores autoadjuntos en el espacio de Hilbert, son el dominio ontológico *haces de instancias de propiedades-tipo con sus correspondientes propiedades-caso posibles*. Por ejemplo, al sistema S^i le corresponde el haz de instancias de propiedades-tipo $h^i = \{[A^i], [B^i], [C^i], \dots\}$.

En notación más breve, podemos asociar el sistema S^i al haz $S^i(\vartheta^i)$, donde ϑ^i representa al álgebra de operadores $\{[A^i], [B^i], [C^i], \dots\}$. Por supuesto, es posible enriquecer la notación para incluir también las propiedades-caso posibles correspondientes, tal como hace Calosi 2022, para quien el sistema S^i es el haz constituido por la colección $\langle C = \{O^i \subset \vartheta^i\}, \{o_j^i\} \rangle$.

La OPP está diseñada principalmente para dar cuenta de la contextualidad cuántica. A causa de esta característica, los sistemas cuánticos no satisfacen el llamado “principio de determinación omnimoda”, que se cumple en el dominio clásico. Este principio metafísico establece que, si un objeto tiene una cierta instancia de una propiedad-tipo, entonces se actualiza una de sus posibles propiedades-caso. Formalmente (ver Calosi, 2022).

$$O^i(x) \rightarrow \exists o_j^i(o_j^i(x)) \quad (1)$$

Como consecuencia de la falla de dicho principio en el dominio cuántico, resulta admisible (incluso necesario) que los sistemas cuánticos tengan instancias de propiedades-tipo que no están determinadas en una propiedad-caso. Este hecho físico queda reforzado por el célebre teorema de Kochen y Specker (1967), el cual excluye la posibilidad de extender la teoría para asignar valores definidos a todos los contextos sin romper las relaciones funcionales correspondientes. Del teorema puede entonces inferirse que la modalidad cuántica no tiene una naturaleza epistémica sino metafísica. La OPP aborda esta característica de la mecánica cuántica permitiendo que las propiedades cuánticas tengan un carácter modal. Como se establece en los postulados anteriores, los sistemas cuánticos son haces de propiedades *posibles*. Cuáles de esas propiedades posibles se consideran actualizadas depende de la regla de actualización que se establece en cada interpretación modal particular. De esta manera, se obtiene una ontología directamente adaptada a la cuestión de la contextualidad cuántica, que puede dar clara cuenta de la falla del principio de determinación omnimoda.

¿Cómo lidia esta propuesta de ontología con la indistinguibilidad cuántica? A pesar de que la OPP es una aplicación de la teoría de haces (*bundle theory*) a sistemas cuánticos, los autores (en línea con la llamada “visión recibida” respecto el problema cuántico de la indistinguibilidad) rechazan que los haces cuánticos sean individuos (da Costa y Lombardi, 2014). Para ellos, en el caso de haces cuánticos indistinguibles, el principio de identidad de los indiscernibles (PII) no se aplica, a diferencia de lo que se espera de los haces clásicos. PII establece formalmente que

$$\forall x \forall y \forall P (Px \leftrightarrow Py) \rightarrow (x = y) \quad (2)$$

Profundicemos en este punto. Hay tres versiones de PII, que difieren respecto al conjunto de propiedades permitidas. Ordenadas de acuerdo a fuerza lógica creciente, son (French y Krause, 2006):

- PII(1) Si dos objetos tienen todas sus propiedades monádicas y relacionales en común, entonces son idénticos.
- PII(2) Si dos objetos tienen todas sus propiedades monádicas y relacionales en común, excepto las espacio-temporales, entonces son idénticos.
- PII(3) Si dos objetos tienen todas sus propiedades monádicas en común, entonces son idénticos.

PII(1) es necesario pero trivial. PII(2) y PII(3), lógicamente más fuertes, están expuestos a contraejemplos (e. g. esferas de Black). Por un lado, la OPP debe hacer foco en PII(3), ya que según ella las relaciones que tienen los haces cuánticos se reducen a sus propiedades intrínsecas (dos haces con las mismas propiedades intrínsecas no podrían diferir en sus relaciones). Por otro lado, según la estadística cuántica, los sistemas cuánticos del mismo tipo son indistinguibles, es decir, difieren *solo numero*. Si, en el dominio cuántico, es el caso que PII(3), entonces los sistemas cuánticos no podrían tener tal diferencia numérica. ¿Se da que PII(3) falla en el dominio cuántico? Según los autores de la OPP, ese sería el caso si los sistemas cuánticos fueran haces de propiedades actuales (como se supone que son los haces clásicos). Pero dado que los sistemas cuánticos son, según esta ontología, haces de propiedades posibles, PII(3) simplemente no se aplica. En la OPP, la modalidad es la piedra de toque que ayuda a resolver el enigma de la indistinguibilidad. Volveremos a este tema en la Sección 9.

Al igual que en cualquier versión de la teoría de haces, la OPP debe enfrentar la pregunta de cuál es la *bundling relation* o “relación constituyente” que media entre las propiedades de un haz de modo que éste se considere un haz propiamente dicho y se distinga de una mera colección de propiedades sin referencia. La “copresencia” es la relación que constituye haces propiamente dichos si las propiedades son tropos. De manera similar, la “coinstanciación” es la relación de equivalencia que constituye haces propiamente dichos si las propiedades son instancias de universales. En ambos casos la relación constituyente se toma como primitiva. Dado que el último es el caso de la OPP, parece que dicha ontología está comprometida con la coinstanciación como relación constituyente primitiva. Sin embargo, la no aplicabilidad de PII(3) junto con el carácter intrínseco de las propiedades que podrían discernir implica que la OPP es radical sobre las condiciones de identidad de los haces cuánticos. Como se enfatizó anteriormente, no son objetos individuales, es decir, no tienen identidad absoluta (identidad que depende de propiedades intrínsecas). Incluso más, no pueden tratarse siquiera de objetos relacionales, poseedores de una identidad relativa (identidad dependiente de propiedades relacionales), ya que relaciones dependientes de las propiedades intrínsecas no pueden discernir si éstas no lo han hecho ya. Como resultado, los haces de la OPP no tienen condiciones de identidad en absoluto. En línea con esta argumentación, Lombardi (2023) argumenta que en la OPP los haces cuánticos ni siquiera son objetos. En este escenario, cada colección de propiedades cuánticas podría contar como un haz cuántico propiamente dicho. De aquí que la OPP no requiera ninguna relación primitiva que constituya a los haces. Esta característica de

la OPP puede hacerla parecer más parsimoniosa en comparación con otras propuestas de ontología cuántica.

2. Mecánica Cuántica Relacional y Ontologías Relacionales

La mecánica cuántica relacional (RQM) de Rovelli (1996) es probablemente una de las interpretaciones más populares de la mecánica cuántica en la actualidad. Ha inspirado al menos dos propuestas de ontología de la mecánica cuántica. Laura Candiotta (2017) esboza una propuesta en la que la ontología cuántica es una instancia del realismo estructural óptico (OSR, por sus siglas en inglés; Ladyman, 2007; 2020). Andrea Oldofredi (2021) articula una propuesta en la que la ontología cuántica es una instancia del realismo estructural moderado (MSR, por sus siglas en inglés; ver Esfeld, 2004; Esfeld y Lam, 2010).

A continuación, mencionamos algunas características destacadas de la RQM. La RQM resuelve el problema de la medición al reducir las interacciones de medición a interacciones ordinarias. Según esta interpretación, cada interacción equivale a la ocurrencia de un evento. Esto significa que cada interacción comporta la adquisición de valores definidos para un cierto conjunto de observables compatibles de un sistema-objeto. La característica distintiva de la RQM es que el sistema-objeto adquiere valores definidos mediante una proyección de su estado que es sólo relativa a un sistema-testigo. Es importante destacar que la RQM no atribuye un estatus ontológico al estado cuántico; es sólo un dispositivo para calcular probabilidades cuánticas. Otra característica importante de la RQM que la distingue notablemente de las interpretaciones modales y de otras interpretaciones relacionales es que los sistemas cuánticos no evolucionan de manera puramente unitaria, ya que la ocurrencia de eventos depende de proyecciones del estado (aunque sean relativas). Además, según la RQM no existe tal cosa como un estado cuántico del universo, ya que los estados y las propiedades cuánticas siempre son relativas a un sistema-testigo.

Por lo general, se asume que la ontología de la RQM es aquella en la que los eventos relacionales son los elementos básicos (Laudisa y Rovelli, 2021). Siguiendo esa línea, Candiotta (2017) defiende el carácter fundamental de las relaciones e incluso adopta una perspectiva eliminativista respecto a los objetos relacionados o *relata*. De aquí que ella considera que la ontología de la RQM es una instancia de OSR. De hecho, OSR es sólo realista respecto a las relaciones y a las estructuras que ellas conforman. La autora es extremadamente crítica de las propuestas de ontología en las que los objetos tienen prioridad ontológica respecto a las relaciones (por ejemplo, ontologías en las que las propiedades inhiere en un sustrato o son intrínsecas o en las que las relaciones son simplemente externas). Evita cualquier compromiso realista con respecto a los objetos cuánticos y prefiere considerar a los sistemas cuánticos como procesos que toman el lugar de los *relata* requeridos por las relaciones. Sin embargo, según ella, los procesos relacionados son ellos mismos relaciones, de tal manera que todo lo que hay son relaciones interrelacionadas, conviniendo así con el lema de OSR: “*relations all the way down*”.

Oldofredi (2021) parece adoptar una postura moderada con respecto a la ontología de la RQM. Según él, la ontología de la RQM es una de haces de propiedades que incluyen (no exclusivamente) relaciones no simplemente externas sino inherentes (que no dependen de propiedades intrínsecas). También hay ciertas propiedades independientes del estado (como la masa, la carga, el espín total)

que deben considerarse intrínsecas. Oldofredi emplea la teoría de haces mereológicos (MBT) para articular su ontología de la RQM. Según el autor, los sistemas cuánticos “deben definirse como haces mereológicos de propiedades dependientes del observador que varían en virtud de las interacciones” (Oldofredi 2021, p.18). MBT, una propuesta que se debe a Paul (2017), hace de la composición mereológica la “relación constituyente” (*bundling relation*) que produce haces propiamente dichos. Es decir, las propiedades están relacionadas con el objeto que constituyen de la misma manera que las partes lo están con respecto al todo. En MBT, los haces mereológicos se individualizan por las relaciones espacio-temporales que se dan entre ellos. Por supuesto, esto plantea un problema cuando se trata de dar cuenta de la cuestión de la indistinguibilidad cuántica. Oldofredi tiene que asumir una “diferencia sin fundamento” (*ungrounded difference*) como un principio metafísico adicional para permitir la diferencia numérica entre haces indistinguibles. Además, para acomodar los haces mereológicos a la contextualidad cuántica, Oldofredi tiene que aceptar que en un momento dado no todas las propiedades están metafísicamente determinadas.

Existe una diferencia sustancial entre estas dos propuestas de ontología para la RQM. Candiottto no es realista en cuanto a los objetos, Oldofredi sí lo es. Según la primera, no existen objetos, solo relaciones. Según el segundo, objetos y relaciones están en paridad ontológica. Oldofredi considera que su propuesta de ontología para la RQM es compatible con MSR, que es la forma moderada de realismo estructural propuesta por Esfeld. Según Esfeld, OSR rechaza tanto (1) que las cosas deben tener propiedades intrínsecas además de las relaciones en las que se encuentran como (2) que las relaciones requieren relata, es decir, objetos relacionados (Esfeld, 2004, p.613). Esfeld llama la atención sobre el hecho de que, contrariamente a lo que sostienen los defensores de OSR, no es necesario rechazar (2) si se rechaza (1). Es decir, rechazar las propiedades intrínsecas no fuerza el rechazo de objetos relacionados. MSR, por su parte, surge del rechazo de (1) y de la aceptación de (2). Es decir, MSR rechaza las propiedades intrínsecas, pero acepta objetos relacionados. Ciertamente, si las propiedades dependieran de un sustrato o si los objetos fueran haces de propiedades intrínsecas, los objetos se constituirían o incluso se identificarían independientemente de sus relaciones y tendrían prioridad ontológica sobre ellas. Sin embargo, es posible concebir a los objetos como haces constituidos por relaciones inherentes. Si así fuera, se obtendría relata que quedarían constituidos por las relaciones en las que se encuentran, razón por la cual no podrían tener prioridad ontológica sobre las relaciones. Las relaciones y los objetos relacionados quedarían en paridad ontológica.

Finalizamos la sección con algunos apuntes críticos respecto a estas propuestas. En primer lugar, respecto a la propuesta de Oldofredi: ¿cómo es posible que los haces mereológicos estén en paridad ontológica con sus propiedades y relaciones si estas últimas son las partes de los haces? En la medida en que MBT no se comprometa explícitamente con una forma de holismo, las partes deberían considerarse anteriores al todo. Por lo tanto, no queda claro cómo una propuesta basada en MBT podría ser una instancia de MSR. En segundo lugar, MBT parece perder su atractivo cuando nos adentramos en el dominio cuántico. De hecho, la razón detrás del uso de teorías de haces es prescindir de supuestos metafísicos que estén más allá de las propiedades. Pero, dado que los haces mereológicos no pueden ser distinguirse numéricamente en el dominio cuántico en virtud de relaciones espacio-temporales (como supone MBT ocurre en el dominio clásico), Oldofredi tiene que adoptar un principio metafísico adicional, la *ungrounded difference*, para dar cuenta de la

diferencia numérica entre haces cuánticos indistinguibles. Con respecto a la propuesta de Candiottto, es posible plantear la misma objeción que se plantea comúnmente contra cualquier forma de OSR radical: las relaciones son ininteligibles sin relata. Parece que Candiottto adopta una perspectiva radical en su propuesta de ontología para la RQM porque tiene en mente una noción de objeto que comporta necesariamente un sustrato o propiedades intrínsecas. Es decir, para ella y presumiblemente para los defensores de OSR en general, la alternativa a otorgar prioridad ontológica a los objetos sobre las relaciones es solo dar prioridad a las relaciones por sobre los objetos, excluyendo la posibilidad contemplada por MSR de que relaciones y objetos estén en paridad ontológica.

3. Carácter Holista de la QM basado en el Entrelazamiento

En las últimas décadas, un grupo de autores han trabajado sobre el tema del carácter holista de la mecánica cuántica basándose en las peculiaridades de los estados cuánticos entrelazados. Consideremos un ejemplo sencillo. Sean las partículas de espín semi-entero S^1 y S^2 , subsistemas de S^U . Los posibles estados de S^1 son $|\uparrow_1\rangle$ (*spin up*) o $|\downarrow_1\rangle$ (*spin down*), que son autoestados del observable S_{1z} (espín en la dirección z) con autovalores (1) y (-1) respectivamente. De modo similar, los posibles estados de S^2 son $|\uparrow_2\rangle$ o $|\downarrow_2\rangle$, autoestados de S_{2z} con autovalores (1) y (-1) . Asumamos que el estado del sistema compuesto S^U es el llamado estado “singlete”

$$|\Psi_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow_1\rangle \otimes |\downarrow_2\rangle - |\downarrow_1\rangle \otimes |\uparrow_2\rangle) \quad (3)$$

El estado $|\Psi_1\rangle$ es no separable ya que no puede ser escrito como un producto tensorial de autoestados de los subsistemas S^1 y S^2 . Se trata de una combinación lineal (con coeficientes $1/\sqrt{2}$) de los estados producto $|\uparrow_1\rangle \otimes |\downarrow_2\rangle$ y $|\downarrow_1\rangle \otimes |\uparrow_2\rangle$. Estos estados producto son autoestados degenerados del observable S_{Uz} con autovalor (0) . Cualquier combinación lineal de autoestados degenerados es también un autoestado del mismo observable con el mismo autovalor. Como resultado, el estado $|\Psi_1\rangle$ es también un autoestado de S_{Uz} con autovalor (0) . Del estado singlete $|\Psi_1\rangle$ se deducen las siguientes correlaciones entre S_{1z} y S_{2z}

$$\begin{aligned} S_{1z} : (1) &\leftrightarrow S_{2z} : (-1) \\ S_{1z} : (-1) &\leftrightarrow S_{2z} : (1) \end{aligned} \quad (4)$$

Por supuesto, en cualquiera de estos dos casos el observable S_{Uz} de S^U tiene valor (0)

$$\begin{aligned} S_{Uz} &= [(1) + (-1)]^2 = 0 \\ S_{Uz} &= [(-1) + (1)]^2 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

El estado no separable $|\Psi_1\rangle$ es un estado entrelazado con respecto a la estructura producto tensorial (“TPS” por sus siglas en inglés) que “particiona” al sistema S^U en los subsistemas S^1 y S^2 .² Este es el ejemplo usualmente considerado en experimentos reales o ideales del tipo EPR-Bohm.

Debe enfatizarse que las correlaciones debidas al entrelazamiento cuántico no pueden perderse si la dinámica es puramente unitaria. Este hecho ha llevado a muchos autores a especular sobre la posibilidad de que el universo tenga un estado cuántico no separable o entrelazado, lo que podría convenir con una forma de holismo. Esta posibilidad no está disponible para las interpretaciones de la mecánica cuántica que incluyen algún tipo de postulado de proyección. De hecho, la proyección de un estado entrelazado hacia uno de sus términos conduce necesariamente a un estado producto en el que cada uno de los subsistemas está en cierto autoestado. En particular, la RQM no permite la existencia de estados masivamente entrelazados, ya que, según sus postulados, cada interacción ordinaria conduce a un estado separable del sistema compuesto del subsistema-objeto y del subsistema-testigo. Por supuesto, la posibilidad de que el universo tenga un estado no separable está vigente para quienes adopten una interpretación modal de la mecánica cuántica.

De acuerdo a los defensores del holismo cuántico, los subsistemas del universo no tienen propiedades por sí mismos sino solo en conjunción con el resto de los subsistemas del universo. En el estado singlete mencionado anteriormente, el subsistema S^1 no tiene por sí mismo la propiedad $|\uparrow_1\rangle\langle\uparrow_1|$ ni $|\downarrow_1\rangle\langle\downarrow_1|$ (mientras se asuma EEL). Lo mismo ocurre *mutatis mutandis* con S^2 . Sin embargo, es de hecho posible asignar al sistema S^U (asumiendo EEL) la propiedad determinada $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$, que es precisamente la propiedad que S^U tiene cuando pueden darse las correlaciones entre S^1 y S^2 especificadas en la expresión (4). De hecho, $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ es una propiedad determinada de S^U porque el estado de S^U es precisamente $|\Psi_1\rangle$ y es un autoestado del observable global S_{Uz} . De lo contrario, a la propiedad $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ se le podría haber asignado solamente una cierta probabilidad. En discurso modal, la propiedad $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ del sistema S^U es actual bajo la condición de que el estado de S^U sea $|\Psi_1\rangle$, de otro modo hubiera sido solamente una propiedad posible. Lo que ha sido ejemplificado aquí con S_{Uz} es también válido para otros observables globales como el espín total $(S_{1x} + S_{2x})^2 + (S_{1y} + S_{2y})^2 + (S_{1z} + S_{2z})^2$, el momento total $(P_1 + P_2)$ o la distancia relativa $(Q_1 - Q_2)$. De hecho, estos dos últimos observables globales son los empleados por Einstein, Podolsky y Rosen en su célebre artículo de 1935.

Caractericemos el llamado holismo cuántico (QH) con mayor precisión. Mencionamos aquí tres variantes (siguiendo el resumen de Esfeld, 2001). Para Teller (1986) QH es relacional en el sentido de que la existencia de relaciones inherentes entre subsistemas del universo comporta una forma de holismo. Las relaciones inherentes son definidas como relaciones fuertemente no supervenientes. El

² El entrelazamiento es relativo a cierta estructura producto tensorial (Earman, 2015).

autor hace uso de una noción previamente introducida por Carol Cleland (1984). Ella define a una relación débilmente no superveniente como la que no está determinada por las propiedades intrínsecas de sus relata, pero que todavía requiere que algunas propiedades intrínsecas inhieran en los relata. Una relación es fuertemente no superveniente si no está determinada por las propiedades intrínsecas de sus relata y no se requiere que propiedad intrínseca alguna inhieran en los relata (para definiciones formales ver French y Krause, 2006, Sección 4.4). De acuerdo a Teller, las relaciones que se dan entre sistemas entrelazados son un caso de relaciones fuertemente no supervenientes. Continuando con el ejemplo anterior, el autor reduce la propiedad $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ de S^U a la relación fuertemente no superveniente $R(S^1, S^2)$ entre S^1 y S^2 que no podría supervenir sobre las propiedades intrínsecas $|\uparrow_1\rangle\langle\uparrow_1|$ o $|\downarrow_1\rangle\langle\downarrow_1|$ de S^1 o sobre $|\uparrow_2\rangle\langle\uparrow_2|$ o $|\downarrow_2\rangle\langle\downarrow_2|$ de S^2 . Healey (1991) caracteriza a QH en términos de propiedades del sistema total que no supervienen sobre las propiedades de sus subsistemas. En esta variante de QH, la falla en la superveniencia ocurre directamente entre la propiedad $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ de S^U y las propiedades pertenecientes a S^1 y S^2 . Es decir, la propiedad $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ no puede ser descompuesta en propiedades de los subsistemas. Por último, Howard (1989) caracteriza QH no en términos de superveniencia sino en términos de falla de la separabilidad. El principio de separabilidad establecido por este autor es que (1) sistemas espacialmente separados poseen cada uno su propio y distinto estado físico y que (2) el estado conjunto de dos o más sistemas separados está completamente determinado por sus estados separados. En nuestro ejemplo, es claro que si el estado de S^U es el singlete $|\Psi_1\rangle$, entonces (1) no es posible asignar a S^1 y a S^2 estados vector sino solamente estados reducidos que se obtienen de tomar trazas parciales y (2) el estado $|\Psi_1\rangle$ de S^U no puede obtenerse como producto de los estados reducidos de S^1 y S^2 . Entonces, en el caso de entrelazamiento, es claro que el principio de separabilidad de Howard falla tanto en (1) como en (2). Si la separabilidad falla, entonces dos o más sistemas entrelazados constituyen un único sistema, lo que equivale a suscribir QH.

Esfeld (2004) combina las propuestas de Teller y Healey. De acuerdo a este autor, QH comporta que “las relaciones no supervenientes de entrelazamiento entre las partes de un todo cuántico equivalen a que el todo tiene propiedades intrínsecas que no supervienen en propiedades intrínsecas de las partes” y que “existen propiedades del todo que indican la manera en que las partes están relacionadas unas con otras con respecto a algunas de las propiedades que hace a un objeto un sistema cuántico” (p.611). Como resultado, se da que la propiedad intrínseca $|\Psi_1\rangle\langle\Psi_1|$ de S^U equivale a la relación $R(S^1, S^2)$ entre S^1 y S^2 . Basándose en relaciones de entrelazamiento, Esfeld (2004) y Esfeld y Lam (2010) articulan una propuesta de ontología común a las teorías físicas fundamentales enmarcada en MSR. Más recientemente, Esfeld (2017) presenta una ontología minimalista que, aunque es todavía una instancia de MSR, parece estar lejos de QH. Presentaremos algunos detalles de esta última propuesta en la Sección 6.

4. La Ontología de Haces de Relaciones Posibles

En esta sección se esboza una propuesta de ontología modal de relaciones o, en otros términos, una ontología de haces de relaciones posibles (OPR) para la mecánica cuántica. Por supuesto, se espera que esta propuesta sea compatible con las interpretaciones modales. La principal inspiración de la OPR es la OPP. Como ya se ha mencionado en la Sección 1, la OPP se centra principalmente en las cuestiones de la contextualidad e indistinguibilidad cuánticas. Nuestro objetivo es que en la OPR no solo la contextualidad y la indistinguibilidad, sino también QH basado en relaciones de entrelazamiento, obtengan un esclarecimiento desde el punto de vista ontológico. Las relaciones de entrelazamiento, siguiendo la propuesta de Esfeld (2004), se considerarán como relaciones fuertemente no supervenientes y los constituyentes exclusivos de nuestros haces, sin propiedades intrínsecas, de una manera compatible con MSR. La piedra angular de la OPR será su compatibilidad con el monismo de prioridad (PM por sus siglas en inglés), ya que esta última característica permitirá considerar que los haces, aunque estén constituidos por relaciones, están en igualdad ontológica con las relaciones que los constituyen, como exige MSR.

Tengamos presentes los postulados (1), (2) y (3) de la OPP (Sección 1). A continuación, añadimos una definición de subsistemas y de sus haces correspondientes:

- (1) Si un sistema $S^U(\mathcal{O}^U)$ admite una TPS tal que para todo $O^U \in \mathcal{O}^U$ se obtiene que $O^U = O^1 \otimes I^2 + I^1 \otimes O^2$, el conjunto \mathcal{O}^1 cuyos elementos son los observables O^1 define al subsistema $S^1(\mathcal{O}^1)$ y las instancias de propiedades-tipo $[O^1]$ constituyen su haz correspondiente. El conjunto \mathcal{O}^2 cuyos elementos son los observables O^2 define al subsistema $S^2(\mathcal{O}^2)$ y las instancias de propiedades-tipo $[O^2]$ constituyen su haz correspondiente. Sea $\{TPS\}$ el conjunto de todas las TPSs admitidas por $S^U(\mathcal{O}^U)$ tal que para todo $O^U \in \mathcal{O}^U$ se obtiene que $O^U = O^i \otimes I^i + I^i \otimes O^i$.

Este postulado está parcialmente inspirado en el “postulado de sistemas compuestos” de la MHI (Lombardi y Castagnino, 2008, p.389). De acuerdo al postulado (4) se da que los haces correspondientes a subsistemas están todavía constituidos por conjuntos de instancias de propiedades-tipo *intrínsecas*. Evaluemos si es posible definirlos por medio de conjuntos de relaciones. Añadimos el siguiente postulado trivial

- (2) Sea el sistema total $S^U(\mathcal{O}^U)$ y sus subsistemas $S^1(\mathcal{O}^1)$ y $S^2(\mathcal{O}^2)$. Sean $|o_j^1\rangle$ los autoestados de $O^1 \in \mathcal{O}^1$ correspondientes a las propiedades-caso posibles $[o_j^1]$ y $|o_j^2\rangle$ los autoestados de $O^2 \in \mathcal{O}^2$ correspondientes a las propiedades-caso posibles $[o_j^2]$.

Introduzcamos a continuación el siguiente supuesto que permite la existencia de correlaciones entre las propiedades-caso posibles de los subsistemas a causa del entrelazamiento cuántico

- (3) El estado $|\Psi_U\rangle$ de S^U es puro y no separable tal que $|\Psi_U\rangle = \sum_j c_j |o_j^1\rangle \otimes |o_j^2\rangle$ con dos o más $c_j \neq 0$

Como se ha mencionado en la Sección 3, el supuesto (6) resulta razonable si se adopta una interpretación de la QM en la que la evolución del estado de los sistemas sea puramente unitaria, como es el caso de las interpretaciones modales, entre otras. Adicionalmente, el supuesto de que el estado $|\Psi_U\rangle$ es puro asegura que no haya correlaciones entre S^U y un sistema externo. De esta manera, el sistema S^U resulta un sistema cerrado que podría referir razonablemente al universo. Estamos ahora en condiciones de asignar las siguientes propiedades y relaciones al sistema S^U y a los subsistemas S^1 y S^2 , basándonos en los postulados (1-5) y en el supuesto (6)

- (4) S^U tiene la propiedad-caso actual intrínseca $|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|(S^U)$ y todas las propiedades-caso actuales intrínsecas que conmuten con ella.
- (5) Los subsistemas S^1 y S^2 tienen la relación-tipo actual no superveniente $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$.
- (6) Los subsistemas S^1 y S^2 tienen las relaciones-caso posibles $R_i(S^1, S^2)$. Cada $R_i(S^1, S^2)$ corresponde con cada par de propiedades-caso posibles correlacionadas $[o_j^1]$ y $[o_j^2]$.

De acuerdo a Esfeld (2004) la propiedad $|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|$ de S^U no se reduce a la relación $R(S^1, S^2)$ ni viceversa, sino que son equivalentes: “las relaciones no supervenientes de entrelazamiento entre las partes de un todo cuántico equivalen a que el todo tiene propiedades intrínsecas que no supervienen en propiedades intrínsecas de las partes” (ver Sección 3). Asumiendo este principio, se da como resultado que la propiedad intrínseca del sistema total definida en el postulado (7) y la relación no superveniente entre los subsistemas definida en el postulado (8) son equivalentes. Asumiendo además la perspectiva modal, es posible extender tal equivalencia para afirmar que la relación-tipo no superveniente definida en el postulado (8) equivale al conjunto de relaciones-caso posibles definidas en el postulado (9). Formalmente

$$|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|(S^U) \leftrightarrow R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2) \leftrightarrow R_i(S^1, S^2) \quad (6)$$

A partir de los postulados (7), (8) y (9) es posible redefinir parcialmente los postulados (3) y (4) en términos relacionales

- (3') Un sistema físico en estado puro es en el dominio ontológico un *haz de instancias de propiedades-tipo intrínsecas con sus correspondientes propiedades-caso posibles intrínsecas*. Entre todas las propiedades-caso posibles intrínsecas, la propiedad-caso intrínseca $|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|(S^U)$ junto con todas las propiedades-caso posibles intrínsecas que conmutan con ella son actuales.
- (4') Todo par de subsistemas producidos por una TPS con respecto a la cual el estado $|\Psi_U\rangle$ es no separable es, en el dominio ontológico, un par de haces constituidos por la *instancia de la relación-tipo* $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$ y todas aquellas *instancias de relaciones-tipo* que conmutan con ella, equivalentes a *conjuntos de relaciones-caso posibles* $R_i(S^1, S^2)$.

Estos postulados reformulados continúan asignando un haz de propiedades intrínsecas (como en la OPP) solo a sistemas aislados en estado puro (una condición que probablemente solo el universo satisface estrictamente). Sin embargo, estos postulados ahora asignan haces de relaciones-caso posibles a todos aquellos pares de subsistemas producidos por TPSs que dejan no separable al estado del sistema total (una característica de la OPR que difiere notablemente de la OPP).

Una serie de clarificaciones se proveen a continuación.

(1°) Dado el supuesto (6), una propiedad-*caso* intrínseca del sistema total equivale a una relación-*tipo* de sus subsistemas, ya que si el estado $|\Psi_U\rangle$ es no separable y determina una propiedad-*caso* del sistema total, por ejemplo $|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|(S^U)$, entonces, por el mismo hecho, queda determinada una relación entre las partes que está todavía abierta a ulterior determinación, a saber $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$. Por ejemplo, si el estado $|\Psi_U\rangle$ determina que el espín $S_{Uz} = (S_{1z} + S_{2z})^2$ en la dirección z tiene valor definido cero, i. e. $S_{Uz} : (0)$, en un sistema compuesto de un par de fermiones, entonces la relación $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$ es una relación-*tipo* con respecto a las dos relaciones-*caso* posibles siguientes

$$\begin{aligned} S_{1z} : (1) \wedge S_{2z} : (-1) \\ S_{1z} : (-1) \wedge S_{2z} : (1) \end{aligned} \tag{7}$$

(2°) Cada propiedad-*caso* actual del haz que corresponde al sistema total es equivalente a múltiples relaciones-*tipo* en función del número de TPSs admisibles que dejan el estado del sistema total no separable. Las propiedades del haz que corresponde al sistema total están abiertas a ser determinadas en un doble sentido: en primer lugar, según cuáles sean los subsistemas en los que se divide mediante cierta TPS (como se indica en esta aclaración); y, en segundo lugar, según las diferentes combinaciones de valores posibles que estos subsistemas pueden tomar (como se indica en la primera aclaración).

(3°) En el postulado (3') se establece que un sistema físico en estado puro es en el dominio ontológico un haz de instancias de propiedades-*tipo* intrínsecas. Si el sistema físico al que nos estamos refiriendo es el universo en su totalidad, entonces el postulado (3') puede ser reformulado simplemente eliminando las palabras "instancias de". De hecho, si los sistemas físicos en estado puro son muchos, entonces ellos solo pueden poseer instancias particulares de las propiedades universales. Pero si el sistema en estado puro es único (el universo), entonces las propiedades universales se agotan en una sola instancia. Las propiedades del universo, si una forma fuerte de QH es adoptada (tal como nos proponemos), son a la vez universales y particulares.

(4°) Presumiblemente solo ciertos elementos de $\{TPS\}$ dejan no separable al estado del universo. Podría ser posible adoptar una TPS para la cual el estado del universo resulta separable. Sin embargo, en un universo particionado por una TPS tal, las correlaciones cuánticas quedarían completamente eliminadas. Cada parte del universo estaría en un estado puro y, por lo tanto, cada

una de ellas constituiría de alguna manera un universo cerrado por sí mismo. Particularmente, una TPS tal no parece ser la que media entre nosotros en cuanto observadores y el resto del universo.

(5°) Lo que los postulados anteriores establecen para estructuras bipartitas puede generalizarse para estructuras multipartitas, obteniendo así no solo relaciones diádicas sino también poliádicas.

(6°) La OPR evita conocidas cuestiones acerca de la falla del principio de composición y descomposición de las propiedades que afecta a la mayoría de las interpretaciones modales (Vermaas, 1998, p.110). Dicha falla ocurre cuando el estado del sistema compuesto es no separable. En tal caso, no es posible asignar al sistema compuesto una propiedad que pueda ser descompuesta en propiedades intrínsecas de los subsistemas. La OPR evita dicha falla ya que en general no se asignan propiedades intrínsecas a los subsistemas, solo relaciones posibles entre ellos.

5. La OPR como una Instancia del Monismo de Prioridad

A diferencia de las propuestas de ontología de la mecánica cuántica inspiradas en la RQM en las que no tiene sentido concebir el estado cuántico del universo (ya que no podría ser relativo a otro sistema), la OPR considera que las relaciones posibles entre partes del universo son equivalentes a propiedades intrínsecas del todo. Este hecho plantea la posibilidad de establecer vínculos entre la OPR y el monismo de prioridad (PM). Schaffer (2010b) define al monismo de prioridad como la tesis metafísica que sostiene que solo hay un objeto concreto básico y ese es el universo. Las tesis opuestas son el pluralismo de prioridad (PP), según el cual hay una pluralidad de objetos concretos básicos, y el nihilismo de prioridad (PN), que sostiene que no existen objetos concretos básicos. Formalmente,

$$\begin{aligned} \text{PM: } & \exists x(Bx \wedge \forall y(By \rightarrow x = y)) \\ \text{PP: } & \exists x \exists y(Bx \wedge By \wedge x \neq y) \\ \text{PN: } & \neg \exists x Bx \end{aligned} \tag{8}$$

Donde B es la propiedad de ser un objeto concreto básico (“Monismo” por Schaffer, 2018). Estas son tesis que conciben de manera alternativa la forma en que se da la relación de prioridad ontológica entre diferentes objetos concretos. Schaffer argumenta que PM puede ser defendido en base a las relaciones internas que vincularían a todos los objetos; nótese que las relaciones internas en términos de Schaffer (2010b) son las mencionadas relaciones inherentes, caracterizadas anteriormente como relaciones fuertemente no supervenientes. Él afirma que: “la unidad sustancial de todo el universo se infiere de la interdependencia de todas sus partes” (p.342). De todas las posibles definiciones de relación interna que se han propuesto en la literatura, Schaffer (2010b) destaca la siguiente: una relación interna es tal si es “constrictiva modalmente” (p.350). Es decir, una relación interna es tal que impide la libre recombinación de sus relata. Formalmente, una relación es interna si:

$$(\forall x_1) \dots (\forall x_n) R x_1 \dots x_n \rightarrow \neg M^n x_1 \dots x_n$$

Donde M^n es la relación n -ádica que $x_1 \dots x_n$ tienen cuando pueden recombinar sus propiedades libremente. En consecuencia, si $x_1 \dots x_n$ tienen la relación interna R entonces no pueden recombinar

sus propiedades libremente. La definición de relación interna que Schaffer propone se ajusta al tipo de relaciones que se proponen en la OPR como constituyentes de los haces que corresponden a subsistemas. De hecho, se ha establecido que cada relación-tipo $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$ es equivalente a un conjunto de relaciones-caso posibles $R_i(S^1, S^2)$. Es decir, la relación-tipo $R_{|\Psi_U\rangle\langle\Psi_U|}(S^1, S^2)$ es una instancia de la relación interna definida por Schaffer (2010b) ya que precisamente restringe la libertad modal de sus relata. Esto es, ella habilita solamente ciertas *posibles* combinaciones de los valores *posibles* que pueden tomar ciertos observables de los sistemas S^1 y S^2 (aquellos codificadas en las relaciones-caso *posibles* $R_i(S^1, S^2)$) y excluye cualesquiera otras.

A partir del supuesto de que todos los objetos están internamente relacionados (lo que es consistente con la OPR por su supuesto (6), ver Sección 4) y algunas otras definiciones de carácter metafísico y principios lógicos y mereológicos, Schaffer (2010b) ofrece dos pruebas de PM. En la primera prueba se asume que (1) no hay dos objetos modalmente libres (asunción que se desprende de la asunción de que todos los objetos están internamente relacionados) (2) hay al menos algún objeto básico y (3) cualquier objeto básico es modalmente libre respecto de cualquier otro objeto con el cual no se superponga. Se asume además (para reducir al absurdo) que el objeto a que es parte del universo es básico. Luego se define al objeto b que no se superpone con a . Por (3) a y b son modalmente libres. Sin embargo, por (1) no hay dos objetos modalmente libres. Se prueba por el absurdo que ninguna parte del universo es básica. Dado que por (2) hay al menos algún objeto básico, dicho objeto básico no puede ser otro que el universo mismo. Desde la perspectiva de esta prueba, lo que el universo tiene de particular es que es el único objeto que se superpone con cualquier otro. Esto resulta consistente con la presente propuesta de ontología para la mecánica cuántica en la que los haces de relaciones son siempre partes del haz correspondiente al universo. Además, de esta prueba se sigue que el universo es el único objeto modalmente libre, hecho consistente con la presente propuesta de ontología en la que el sistema del universo es el único con estado puro y por ello se corresponde con el único haz de propiedades intrínsecas.

La segunda prueba (algo más intrincada) corre de la siguiente manera. Se asume que (1) no hay dos objetos modalmente libres y que (4) objetos que no se superponen y que están modalmente constreñidos son interdependientes. Se asume además (para reducir al absurdo) que el universo no es básico y se define al objeto a del cual depende el universo. Dado que la dependencia es asimétrica, a no puede ser dependiente del universo. Luego, ya que la dependencia es irreflexiva, a no puede ser el universo. Puesto que cualquier objeto que no sea el universo es una parte propia del universo, entonces a es una parte propia del universo. A continuación, se define el complemento \hat{a} de a . Los objetos \hat{a} y a no pueden ser modalmente libres por (1). Debido a que ningún objeto se superpone con su complemento y (4), \hat{a} y a son interdependientes. Seguidamente, dado que dos objetos interdependientes o están superpuestos entre sí o forman un todo común, y ya que \hat{a} y a no se superponen entre sí, entonces \hat{a} y a forman un todo común. Por último, puesto que \hat{a} y a dependen de un todo común, \hat{a} y a deben depender del universo, ya que el universo es el único todo que \hat{a} y a tienen en común. Por tanto, a depende del universo, contra el supuesto inicial. En consecuencia, el universo es básico. Supongamos ahora (para luego reducir al absurdo) que algún otro objeto c (que tendría que ser una parte propia del universo) es básico. Defínase el complemento \hat{c} de c . Los objetos

\hat{c} y c resultan interdependientes por la misma razón que \hat{a} y a son interdependientes. Si c es interdependiente entonces es dependiente y no básico, contra el supuesto de que c es básico. Por tanto, ningún otro objeto sino el universo es básico. Desde la perspectiva de esta segunda prueba, lo que hace especial al universo es que es el único objeto que no tiene complemento. Este hecho también resulta consistente con la OPR, en la que los haces de relaciones se definen siempre respecto de su complemento, mientras que las propiedades del haz al que refiere el universo son intrínsecas y por ello este no tiene complemento.

Cabe aclarar que PM no exige que todas las propiedades de los objetos sean relaciones internas, a diferencia de lo que se propone en la OPR. De esto se desprende que PM no es de suyo una forma de realismo estructural, pero podría serlo si solo se admiten relaciones internas. Tal es el caso de la OPR, que parece resultar a la vez una instancia de MSR y de PM. Una segunda aclaración es que, atendiendo a la estructura de las pruebas esgrimidas, PM no se deduce solo de la existencia de relaciones internas (cuya prueba depende de la interpretación de la QM adoptada) sino también de la aceptación sin prueba del fundacionalismo, es decir, se acepta sin más que hay objetos básicos, excluyéndose por principio PN. Si el objeto básico es el todo o si los objetos básicos resultan de alguna partición particular del todo es una cuestión que sí puede decidirse a partir de la existencia de relaciones internas, tal y como las pruebas ofrecidas por Schaffer ponen en evidencia.

6. La OPR como una Instancia de MSR

Mencionamos en la Sección 2 que la propuesta de Candiotti es una instancia de OSR y la de Oldofredi una instancia de MSR. Ahora nos preguntamos cómo se posiciona la OPR con respecto a OSR y MSR. La respuesta natural es que la OPR es una instancia de MSR. Todo indica que en la OPR los haces y las relaciones están en paridad ontológica. Ambos surgen simultáneamente del haz correspondiente al universo una vez que se ha especificado una TPS. Cambiar la partición equivale a cambiar las relaciones, y cambiar las relaciones equivale a redefinir las partes. Las partes y las relaciones correspondientes a cada posible TPS están codificadas en el espacio de Hilbert y en el álgebra de operadores que representan al universo y a sus magnitudes físicas. Los haces relacionados no existen antes de las relaciones (como si fueran *thin particulars* o haces de propiedades intrínsecas o como si las relaciones fueran meramente externas), sino que quedan constituidos por las relaciones inherentes o internas entre las partes del haz correspondiente al universo. Los haces relacionados son, de hecho, partes del todo, pero no son objetos básicos y no tienen prioridad ontológica con respecto al todo y su estructura interna, ya que la OPR es una instancia de PM. En este sentido se ha indicado anteriormente (Sección 4) que la clave que permite considerar a los haces en paridad ontológica con las relaciones es el hecho de que la OPR representa una instancia de PM (si el fundacionalismo es previamente aceptado). Sin embargo, se podría argumentar que, dado que la OPR se enmarca en una teoría de haces, que es una “ontología constituyente” (*constituent ontology*), las relaciones deberían tener prioridad ontológica sobre los haces que constituyen. Parece que, después de todo, cualquier propuesta ontológica basada en alguna forma de la teoría de haces (incluidas la OPR y MBT) no podría convertirse en una instancia de MSR. Creemos que tal argumento podría funcionar si los constituyentes de los haces son los elementos básicos de la ontología, como parece ser el caso en MBT. Ese no es ciertamente el caso en la OPR, en la que el único objeto básico es el haz correspondiente al universo.

Aunque la propuesta de Oldofredi (2021) también se concibe como una instancia de MSR, existen algunas diferencias notables. En primer lugar, las relaciones en la propuesta de Oldofredi y las relaciones en la OPR tienen una naturaleza física diferente. Mientras que en RQM son relaciones de interacción, en la OPR son relaciones de entrelazamiento. Los postulados de RQM impiden la existencia de relaciones de entrelazamiento masivas como las que se asumen en la OPR. Una segunda diferencia es que mientras Oldofredi permite que sus haces de propiedades posean propiedades intrínsecas, así como relaciones, en la OPR, como en la propuesta de Candiotta (2017), solo hay relaciones. Por supuesto, es conveniente admitir (desde el punto de vista de la adecuación entre una propuesta de ontología de QM y la práctica física) que los sistemas cuánticos tienen propiedades intrínsecas, ya que en la práctica física hay magnitudes cuyo valor es independiente del estado y se utilizan para caracterizar tipos de partículas. En ese sentido, tanto la OPR como la metafísica de relaciones de Candiotta (2017), junto con cualquier ontología de QM que adopte el marco metafísico general del realismo estructural, enfrentan el desafío adicional de reducir tales magnitudes a relaciones. En referencia a este punto es que la OPR asume que cada magnitud física propiamente cuántica es un observable capaz de asumir un valor definido solamente en relación con otro sistema físico con respecto al cual su estado está entrelazado (Mermin, 1998).³

Vale la pena mencionar en esta sección que Esfeld (2017) propone una ontología minimalista que también es una instancia de MSR y es similar a la OPR en algunos aspectos. Según él, todo lo que existe en el mundo son “relaciones de distancia que individualizan objetos simples, es decir, puntos de materia” (p.4). Esfeld considera que las siguientes dos afirmaciones ontológicas son equivalentes: “(a) hay un todo (es decir, el universo) que exhibe una diferenciación interna en términos de relaciones que individualizan una pluralidad de objetos simples dentro del todo. (b) Hay relaciones que individualizan objetos simples de modo que las relaciones y los objetos constituyen una configuración que es el universo” (p.3). Parece que la OPR es una instancia de la afirmación (a) (o al menos se aproxima a la afirmación (a) ya que en la OPR los objetos no son necesariamente simples y las relaciones no suelen individualizar) y la ontología minimalista de Esfeld es una instancia de (b). Mientras que (a) parece ser una forma de holismo compatible con PM, (b) parece ser una forma de atomismo compatible con PP. Debe reconocerse que Esfeld considera que (b) es también una forma de holismo (relacional), lo cual es razonable ya que los objetos simples no tienen propiedades intrínsecas sino solo relaciones inherentes o internas. A pesar de su supuesta equivalencia, Esfeld respalda una ontología que es una instancia de (b) porque considera que las instancias de (b) son más parsimoniosas que las instancias de (a). Consideramos que la cuestión de la parsimonia tiene que seguir siendo discutida ya que no es completamente claro que una ontología en la que el universo depende de una pluralidad de objetos simples sea más parsimoniosa que una ontología en la que una pluralidad de objetos depende de un universo simple. De un modo o del otro, en ambos casos tenemos una estructura compleja que diferencia internamente en (a) o constituye un todo en (b). Nótese que la ontología minimalista de Esfeld añade a (b) que las relaciones son relaciones de distancia y que los objetos son puntos de materia. Desde cierto punto de vista, parece que Esfeld está asumiendo compromisos adicionales en su propuesta ontológica en comparación con los compromisos que toma la OPR. A saber, se compromete con un tipo específico de relaciones que

³ Excede a los límites de este trabajo ofrecer una explicación detallada de este asunto (para tales intentos, ver Muller, 2011; Esfeld y Lam, 2010).

deben actualizarse: siempre son relaciones de distancia. En la OPR no se especifica qué contexto se actualiza. El compromiso de Esfeld (que se asemeja al compromiso que hace la mecánica bohmiana con el operador de posición) puede crear un conflicto con la contextualidad cuántica, a menos que, por supuesto, se adopte la mecánica bohmiana en lugar de la mecánica cuántica estándar. Otra diferencia importante entre la OPR y la ontología minimalista de Esfeld es que en esta última hay un compromiso con una TPS particular del sistema total: el que produce los objetos más simples posibles (en este sentido parece tener un aspecto atomista). La OPR, por el contrario, no está comprometido con ninguna TPS en particular, solo exige que el estado del universo sea no separable respecto a la TPS adoptada. Podemos adoptar indiferentemente TPSs de “grano fino” y obtener relaciones de muchos términos y subsistemas con muy pocos grados de libertad u otras de “grano grueso” y obtener relaciones de pocos términos y subsistemas con muchos grados de libertad.

7. La OPR y la “Relación Constituyente”

Toda teoría de haces se enfrenta al problema de especificar alguna “relación constituyente” (*bundling relation*) que relacione a las propiedades de manera de constituir un haz propiamente dicho, distinguiéndolo así de meras colecciones de propiedades sin correlato ontológico. La naturaleza de la relación constituyente es muy discutida entre los defensores y críticos de las teorías de haces.⁴ Esquemáticamente, las teorías de haces en las que las propiedades son instancias particulares de universales utilizan la relación de coinstanciación, y las teorías en las que las propiedades son tropos (elementos básicos particulares y concretos) utilizan la relación de copresencia. En ambos casos, la relación constituyente en cuestión se considera primitiva. Como se mencionó en la Sección 2, Oldofredi (2021) propone una solución alternativa. La relación constituyente adoptada es la relación mereológica que media entre el todo y las partes (Paul, 2017), es decir, las propiedades según este enfoque son las partes del haz que corresponde a un sistema cuántico. Contrariamente, en la OPR, las relaciones mereológicas no se mantienen entre los haces y sus propiedades, sino entre el haz correspondiente al universo y los haces que corresponden a subsistemas. Por lo tanto, en la OPR las relaciones mereológicas no podrían funcionar como la relación constituyente.

Recuérdese que la OPR es tanto una instancia de PM como de MSR, de manera que el único haz que tiene identidad absoluta (dependiente de propiedades intrínsecas) es el haz correspondiente al universo. De aquí que un primer punto a tratar es la especificación de una relación constituyente entre las propiedades intrínsecas del universo. Se puede argumentar que no hay necesidad de especificar tal relación, ya que la constitución del universo se puede tomar como un hecho metafísico primitivo (esto está en línea con la tesis de PM según la cual el único objeto concreto básico es el universo). La necesidad de especificar una relación constituyente que dé lugar a haces propiamente dichos surge cuando hay múltiples formas de agregar propiedades, debiendo distinguir entre agregados que constituyen haces propiamente dichos y otros que no. Dado que no hay propiedades que no pertenezcan al universo, la necesidad de distinguir entre un haz de todas las propiedades propiamente dicho y un haz de todas las propiedades que cuente como mera colección sin correlato ontológico simplemente desaparece. Por esta razón, la constitución del haz correspondiente al

⁴ Véase, por ejemplo, Grupp, 2004; Shiver, 2014.

universo se da de modo primitivo, sin necesidad de justificar este hecho subsumiéndolo bajo principio alguno.

Como corolario, en la OPR no hay necesidad de distinguir entre propiedades universales y sus instancias, es decir, las propiedades intrínsecas del universo son, al mismo tiempo, universales y particulares. Su concreción y carácter particular dependen de la concreción y del carácter particular del objeto que constituyen (y no al revés como en las teorías de tropos o en la teoría de haces adoptada por Oldofredi). Al mismo tiempo, su universalidad depende del hecho de que el objeto que constituyen es el único objeto (con identidad absoluta) y que es el universo. Desde la perspectiva del holismo monista, el problema tradicional respecto a la naturaleza de los universales como “uno-en-muchos” parece quedar simplemente disuelto. Desde esta perspectiva, los universales se agotan en una única instancia, en la medida en que el único particular en el que las propiedades se instancian es el universo. Esta característica de la OPR puede hacerla más parsimoniosa en comparación con otras propuestas de ontología de la mecánica cuántica.

Queda por especificar cuál es la relación constituyente para los haces correspondientes a subsistemas. Una posible respuesta a esta pregunta es radical y consiste en negar que los haces de relaciones tengan condiciones de identidad en absoluto. En tal caso, no habría necesidad de especificar una relación constituyente, pero los haces perderían su estatus de objetos. Esta solución mantiene continuidad con la propuesta de la OPP en cuanto a la negación de la condición de objeto de los sistemas cuánticos (ver Sección 1). Sin embargo, una forma menos extrema de abordar este problema es hacer uso de una noción relativizada de objeto. De hecho, los haces de relaciones podrían poseer condiciones de identidad que no derivan de propiedades intrínsecas, sino precisamente de las relaciones en las que se encuentran, que a su vez son las mismas relaciones que los constituyen. La condición de objeto de cada haz puede relativizarse al haz (o haces) con el que está relacionado. En este sentido, esta propuesta se acerca a la de Muller y Saunders (2008) en la que tratan a los sistemas cuánticos como “relacionales” en lugar de individuos. Para ellos, los individuos tienen identidad absoluta, es decir, se distinguen mediante sus propiedades intrínsecas, y los relacionales tienen identidad relativa, es decir, se distinguen mediante sus relaciones. En el caso de que dos objetos tengan las mismas propiedades intrínsecas y relacionales, su diferencia numérica aún puede explicarse mediante la llamada “discernibilidad débil” (*weak discernibility*), si las relaciones simétricas en las que se encuentran son irreflexivas, como se argumenta para los sistemas cuánticos indistinguibles.⁵

Considérese que los elementos constitutivos de los haces de relaciones no pueden asimilarse a propiedades intrínsecas que existen con independencia de su agrupamiento en un haz o en otro. Al contrario, en la OPR, las relaciones se definen al mismo tiempo que los pares (o “*n*-tetos” si se adoptan TPSs multipartitas) de haces recíprocos que se constituyen por medio de ellas. En consecuencia, a diferencia de las teorías de haces de propiedades intrínsecas en las que es necesario postular, además de las propiedades, una relación primitiva de naturaleza puramente metafísica para obtener haces propiamente dichos, parece que, en la teoría de haces de relaciones propuesta por la OPR, las mismas relaciones que se agrupan tienen el efecto constituyente requerido. De hecho, los haces correspondientes a subsistemas no se constituyen uno por uno en virtud de la agregación de

⁵ Más sobre este punto en la Sección 9, donde se trata el problema de la indistinguibilidad.

una serie de relaciones, sino que se constituyen de una sola vez en virtud de la diferenciación interna entre partes que cierto conjunto de relaciones produce dentro del haz correspondiente al universo (cada conjunto de relaciones corresponde a una TPS). Las relaciones de la OPR se agrupan de tal manera que dan lugar a partes complementarias del todo. Pero la partición del todo es a su vez la que define a las relaciones. Por lo tanto, las relaciones de la OPR se agrupan necesariamente formando determinado conjunto de haces complementarios. No hay lugar para que las relaciones constituyan haces propiamente dichos o bien meras colecciones. Además, el agrupamiento de las relaciones de la OPR no es análogo al agrupamiento de propiedades intrínsecas en el que algunas propiedades intrínsecas forman un haz y otras propiedades intrínsecas forman otro haz. Aquí tenemos que, dada una TPS, todas las relaciones intervienen en la constitución de cada haz. Estas relaciones corresponden exactamente a las correlaciones que el formalismo de QM permite definir cuando el estado del sistema total es no separable. No tienen una naturaleza puramente metafísica y primitiva, evitando así los conocidos problemas que surgen en las teorías de haces respecto a la naturaleza de la relación constituyente.

En resumen, junto con la disolución del problema de los universales que nos permite considerar que la constitución del haz correspondiente al universo es un hecho primitivo, esta posibilidad de reducir la relación constituyente de los haces correspondientes a subsistemas a relaciones físicas claramente definidas, sin recurrir a una relación de naturaleza puramente metafísica, puede constituir una ventaja adicional de la OPR, nuevamente, en términos del principio metodológico de parsimonia.

La cuestión referida a la identidad diacrónica del haz correspondiente al universo y de los haces de relaciones correspondientes a subsistemas en la OPR no ha sido abordada aquí. Sin embargo, se puede sugerir que este problema desaparecería si junto con la OPR adoptáramos el llamado *timeless approach* para tratar la cuestión del tiempo⁶, que reduce el tiempo externo a correlaciones internas entre subsistemas del universo, como las postuladas en la OPR. Para lograrlo, sería suficiente añadir al supuesto (6) que el estado del universo es estacionario, es decir, un autoestado del Hamiltoniano.

8. La OPR y la Contextualidad Cuántica

En lo que respecta a la contextualidad cuántica, la OPR imita exactamente el enfoque de la OPP. Se acepta como principio que tanto las propiedades actuales como las meramente posibles pueden coexistir. Tanto en la OPP como en la OPR, los haces, ya sean de propiedades intrínsecas o de relaciones, se definen directamente en el dominio de lo posible. Son haces de propiedades-tipo o de relaciones-tipo no determinadas. A cada propiedad-tipo o relación-tipo le corresponde, respectivamente, un conjunto de propiedades-caso posibles o de relaciones-caso posibles. De esta manera, tanto la OPP como la OPR se ajustan a las restricciones impuestas por la contextualidad cuántica y al teorema de Kochen y Specker (1967). Por supuesto, esta característica de la OPR la hace especialmente adecuada para las interpretaciones modales. La OPR no especifica qué contexto particular se toma como actualizado. Ese punto queda reservado para ser especificado mediante la regla de actualización incluida en los postulados interpretativos de las interpretaciones modales. Si adoptamos MHI, entonces el contexto definido por el operador Hamiltoniano es el elegido. Si se

⁶ Sobre el llamado *timeless approach*, ver Marletto y Vedral, 2017; Page y Wootters, 1983.

adopta BDMI, SDMI o PMI, el contexto que debe actualizarse es el definido por el operador densidad que representa el estado del sistema (Dieks, 2021). Diferentes motivaciones (además de la adecuación empírica) pueden guiar la elección de una regla de actualización u otra.

En cuanto a las propiedades actuales del único haz de propiedades intrínsecas que la OPR acepta, es decir, el haz correspondiente al universo, la OPR difiere ligeramente de la OPP. Según el postulado (3'), dicho haz se define no solo como un conjunto de propiedades-caso posibles correspondientes a instancias de propiedades-tipo. Además, se especifican ciertas propiedades-caso actuales. Las propiedades actuales del haz correspondiente al universo quedan determinadas por el estado del universo. Este movimiento es necesario ya que la OPR selecciona precisamente aquellas propiedades-caso del haz correspondiente al universo que son equivalentes a las relaciones-tipo que los subsistemas tienen cuando el estado del sistema total es no separable con respecto a esos subsistemas. Si en este punto dejamos de lado EEL y aplicamos al haz correspondiente al universo una regla de actualización alternativa, se podrían obtener propiedades-caso correspondientes a autoestados del sistema total que son separables con respecto a los subsistemas. En consecuencia, las propiedades intrínsecas del sistema total no equivaldrían a relaciones entre los subsistemas. Serían propiedades del todo que se pueden descomponer en propiedades intrínsecas de las partes. Esto atentaría contra la imagen holista y relacional que la OPR pretende ofrecer. Ciertamente, esa regla de actualización mínima incorporada en la OPR representa una concesión parcial a EEL. Recordemos la formulación de EEL: un sistema tiene cierta propiedad, es decir, un observable determinado posee cierto valor definido, si y solo si su estado es el autoestado correspondiente a ese autovalor. La OPR admite el primer condicional de ELL (pero no el "solo si") ya que las propiedades actuales del universo según la OPR corresponden a los autovectores de observables que coinciden con el estado del universo. Entonces, si se adopta una interpretación modal junto con la OPR, su regla de actualización podrá ir en contra del condicional "solo si" de EEL, pero no en contra del primer condicional, como de hecho ocurre en todas las interpretaciones modales excepto MHI, que rechaza los dos condicionales de ELL. Esto se debe a que (1) para el haz correspondiente al universo, el estado es el autovector común a un conjunto de observables compatibles que corresponde precisamente a sus propiedades-caso actuales; y (2) para los haces correspondientes a subsistemas, sus estados (si se permite hablar de los estados de sistemas entrelazados) no pueden ser estados vector y por tanto no podrían ser autovectores de ningún observable. En consecuencia, el primer condicional de EEL ("si") se cumple para el haz correspondiente al universo y se cumple vacuamente para los haces correspondientes a subsistemas. El segundo condicional de EEL ("solo si"), aunque debe cumplirse para el haz correspondiente al universo, dejaría de cumplirse apenas se asignen relaciones-caso actuales a los haces correspondientes a los subsistemas.

9. La OPR y la Indistinguibilidad Cuántica

PII fue concebido para dar cuenta de las condiciones de identidad de haces de propiedades sin recurrir a la noción metafísica de substrato. Por supuesto, adoptar una teoría de haces para dar cuenta de sistemas cuánticos indistinguibles pero numéricamente diferentes plantea un desafío. Como se mencionó anteriormente, la OPP aborda este desafío al apelar precisamente al carácter modal de las propiedades que constituyen a los haces (ver Sección 1). Dos instancias de la misma propiedad-tipo son indistinguibles si tienen las mismas propiedades-caso posibles. Si las instancias de propiedades-

tipo que constituyen dos haces estuvieran todas determinadas, es decir, si se pudiera asignar una (y solo una) propiedad-caso actual a cada una de las instancias de propiedades-tipo (como se asume ocurre en los haces clásicos) y si esas instancias de propiedades-tipo, además de tener las mismas propiedades-caso posibles, poseyeran la misma propiedad-caso actual, entonces se aplicaría PII y la distinción numérica entre los dos haces desaparecería. Sin embargo, debido a la contextualidad cuántica, los haces cuánticos siempre tienen al menos algunas instancias de propiedades-tipo no determinadas, es decir, para las cuales se pueden especificar propiedades-caso posibles, pero no cuál de ellas es la propiedad-caso actual. Este es precisamente el punto que permite a la OPP superar el desafío que la indistinguibilidad cuántica impone a PII. De hecho, dos haces de instancias de propiedades-tipo pueden ser indistinguibles en cuanto a sus propiedades-caso posibles y, sin embargo, ser numéricamente diferentes ya que aún pueden diferir en alguna propiedad-caso actual, aunque eso nunca ocurra en la actualidad. En ese sentido, es aceptable que PII no se aplique a haces de propiedades meramente posibles.

Pasemos ahora a la misma cuestión en la OPR. En primer lugar, se debe reconocer la legitimidad de la estrategia adoptada por la OPP. Si el haz correspondiente al universo se pudiera comparar con un universo indistinguible en términos de sus propiedades posibles, es razonable suponer que solo subsistiría una diferencia numérica en virtud de los principios adoptados en la estrategia de la OPP. Sin embargo, en el caso de los haces correspondientes a subsistemas, la estrategia podría ser otra. En lugar de bloquear la aplicación de PII, se puede recurrir a una forma de PII en la que se admita que las relaciones simétricas pero irreflexivas son capaces de establecer una diferencia numérica. Esta es el enfoque de la “discernibilidad débil” (*weak discernibility*) propuesta por Muller y Saunders (2008). De hecho, debido a la naturaleza metafísica de las relaciones, se requiere la diferencia numérica entre al menos dos relata, ya que nada puede estar en una relación irreflexiva consigo mismo (Esfeld y Lam, 2010, p.148). Existe una correspondencia natural entre las relaciones a partir de las cuales sería posible discernir débilmente numéricamente y las correlaciones cuánticas entre sistemas indistinguibles. En efecto, la mecánica cuántica exige simetrizar o antisimetrizar el estado de un sistema compuesto por subsistemas indistinguibles. Tal operación de simetrización o antisimetrización necesariamente produce estados entrelazados para los subsistemas, que es la condición que generalmente establece el supuesto (6) en la OPR para todos los subsistemas del universo (indistinguibles o distinguibles). No es una contingencia que las relaciones simétricas e irreflexivas en las que Muller y Saunders (2008, p.535) centran su atención puedan encuadrarse dentro de las relaciones definidas en el postulado (4’) de la OPR. Como ventaja adicional de adoptar la discernibilidad débil en el contexto de la OPR, se obtiene que, en virtud del supuesto (6) de la OPR, no solo se distinguen de manera categórica los fermiones, sino también los bosones. De hecho, los estados producto en los que los bosones se distinguen solo de manera probabilística (pero no categórica) están prohibidos por el supuesto (6). La posibilidad de esta combinación natural entre la discernibilidad débil y la OPR representa una ventaja comparativa de la OPR con respecto, por ejemplo, a la propuesta de Oldofredi, en la cual la diferencia numérica entre sistemas idénticos debe ser aceptada como una “diferencia sin fundamento”.

Consideración Final

En el presente trabajo se ha ofrecido una propuesta para una ontología de haces de relaciones posibles para la mecánica cuántica (OPR), que podría asociarse con una interpretación de naturaleza modal. El núcleo teórico de la presente propuesta es la ontología ya establecida de haces de propiedades intrínsecas posibles. La OPR acomoda en una ontología de propiedades posibles los aspectos relacionales de la mecánica cuántica basados en el fenómeno del entrelazamiento cuántico. Se ha obtenido que la OPR resulta una instancia tanto del monismo de prioridad como del realismo estructural moderado. La OPR parece abordar adecuadamente los problemas de la contextualidad y la indistinguibilidad cuánticas. También se ha sugerido que la presente propuesta es parsimoniosa en varios aspectos: prescinde de sustratos, propiedades intrínsecas (para los haces correspondientes a subsistemas), de relaciones constituyentes (*bundling relations*) y podría contribuir a aclarar el problema de los universales. Además, se ha señalado que la OPR podría complementar ventajosamente a la discernibilidad débil (*weak discernibility*) y al enfoque atemporal (*timeless approach*).

Referencias

- Bene, G. y Dieks, D. (2002). A perspectival version of the modal interpretation of quantum mechanics and the origin of macroscopic behavior. *Foundations of Physics*, 32: 645-671. <https://doi.org/10.1023/A:1016014008418>
- Calosi, C. (2022). Quantum modal indeterminacy. *Studies in History and Philosophy of Science* 95, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2022.08.012>
- Candiotto, L. (2017). The reality of relations. *Giornale di Metafisica*, vol 2/2017, pp. 537-551. <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/14165>
- da Costa, N. y Lombardi, O. (2014), Quantum mechanics: Ontology without individuals. *Foundations of Physics*, 44: 1246-1257. <https://doi.org/10.1007/s10701-014-9793-1>
- da Costa, N., Lombardi, O. y Lastiri, M. (2013). A modal ontology of properties for quantum mechanics, *Synthese*, 190: 3671–3693. <https://doi.org/10.1007/s11229-012-0218-4>
- Dieks, D. (1988). The formalism of quantum theory: an objective description of reality? *Annalen der Physik*, 7: 174–190. <https://doi.org/10.1002/andp.19885000304>
- Dieks, D. (1989). Resolution of the measurement problem through decoherence of the quantum state. *Physics Letters A*, 142: 439-446. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(89\)90510-0](https://doi.org/10.1016/0375-9601(89)90510-0)
- Dieks, D. (2021). Modal interpretations of quantum mechanics. En: Freire, O. (ed.), *Oxford Handbook of the History of Interpretations of Quantum Mechanics*, Oxford: Oxford University Press, Cap. 47. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198844495.013.0048>
- Earman, J. (2015). Some Puzzles and Unresolved Issues About Quantum Entanglement. *Erkenntnis* 80, 303–337. <https://doi.org/10.1007/s10670-014-9627-8>

- Einstein, A., Podolsky, B., y Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47: 777–780. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- Esfeld, M. (2001). The Meaning of Quantum Holism. En: *Holism in Philosophy of Mind and Philosophy of Physics*. Synthese Library, vol 298. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1787-8_8
- Esfeld, M. (2004). Quantum Entanglement and a Metaphysics of Relations, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35: 601–17. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2004.04.008>
- Esfeld, M. (2017). A proposal for a minimalist ontology. *Synthese* 197: 1889–1905. <https://doi.org/10.1007/s11229-017-1426-8>
- Esfeld, M. y Lam, V. (2010). Ontic Structural Realism as a Metaphysics of Objects. En: Bokulich, A., Bokulich, P. (eds.) *Scientific Structuralism*. Boston Studies in the Philosophy and History of Science, vol. 281. Springer, Dordrecht, pp. 143-159. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9597-8_8
- French, S. y Krause, D. (2006), *Identity in Physics: A Formal, Historical and Philosophical Approach*, Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/0199278245.001.0001>
- Grupp, J. (2004). Compresence Is A Bundle: A Problem For The Bundle Theory Of Objects. *Metaphysica* 5 (2):63-72.
- Howard, D. (1989). Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments. En: Cushing, J. T. y McMullin, E. (eds.). *Philosophical Consequences of Quantum Theory*. University of Notre Dame Press, pp. 224-253. <https://undpress.nd.edu/9780268015794/philosophical-consequences-of-quantum-theory/>
- Kochen, S. (1985), A new interpretation of quantum mechanics. En: Lahti, P. J. and Mittelstaedt, P. (eds.). *Symposium on the Foundations of Modern Physics*. Singapore: World Scientific, pp. 151-169. <https://doi.org/10.1142/9789814542098>
- Kochen, S. y Specker, E. (1967), The problem of hidden variables in quantum mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17: 59-87. <http://dx.doi.org/10.1512/iumj.1968.17.17004>
- Ladyman, J. (2020), Structural Realism. En: Zalta, E. N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2020 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/win2020/entries/structural-realism/>
- Ladyman, J., Ross, D., Spurrett, D. y Collier, J. (2007). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press, Oxford. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199276196.001.0001>
- Laudisa, F. y Rovelli, C. (2021). Relational Quantum Mechanics. En: Zalta, E. N. (ed.). *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2021 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/win2021/entries/qm-relational/>

- Lombardi, O. (2023). Not individuals, nor even objects: On the ontological nature of quantum systems. En: Becker Arenhart, J. R. y Wohnrath Arroyo, R. (Eds.) *Non-Reflexive Logics, Non-Individuals, and the Philosophy of Quantum Mechanics*. Springer Synthese Library. pp.47-62. <https://link.springer.com/book/9783031318399>
- Lombardi, O. y Castagnino, M. (2008), A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39: 380-443. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2008.01.003>
- Marletto, C. y Vedral, V. (2017). Evolution without evolution and without ambiguities. *Physical Review D* 95: 043510. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.043510>
- Mermin, N. D. (1998). What is quantum mechanics trying to tell us? *American Journal of Physics* 66, 753–767. <https://doi.org/10.1119/1.18955>
- Muller, F. A. (2011) Withering away, weakly. *Synthese* 180, 223–233. <https://doi.org/10.1007/s11229-009-9609-6>
- Muller, F. A. y Saunders, S. (2008). Discerning Fermions. *The British Journal for the Philosophy of Science* 59 (3): 499-548. <http://dx.doi.org/10.1093/bjps/axn027>
- Oldofredi, A. (2021). The Bundle Theory Approach to Relational Quantum Mechanics. *Foundations of Physics* 51 (1):1-22. <https://doi.org/10.1007/s10701-021-00407-2>
- Page D. N. y Wootters W. K. (1983). Evolution without evolution: Dynamics described by stationary observables. *Physical Review D* 27: 2885. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.27.2885>
- Paul, L. (2017). A One Category Ontology. En: Keller, J. (ed.) *Being, Freedom and Method. Themes from the Philosophy of Peter van Inwagen*. Oxford University Press, Oxford. Pp. 32-61. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198715702.003.0003>
- Rovelli, C. (1996). Relational quantum mechanics. *Int. J. Theor. Phys.* 35(8): 1637–1678. <https://doi.org/10.1007/BF02302261>
- Schaffer, J. (2010a). Monism: The Priority of the Whole. *Philosophical Review* 119: 31–76. <https://doi.org/10.1215/00318108-2009-025>
- Schaffer, J. (2010b). The Internal Relatedness of All Things. *Mind*, Volume 119, Issue 474, April 2010, Pages 341–376, <https://doi.org/10.1093/mind/fzq033>.
- Schaffer, J. (2018). Monism. En: Zalta, E. N. (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2018 Edition). <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/monism>
- Shiver, A. (2014). Mereological bundle theory and the identity of indiscernibles. *Synthese* 191, 901–913. <https://doi.org/10.1007/s11229-013-0298-9>
- Teller, P. (1986). Relational holism and quantum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science* 37, 71–81. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1093/oxfordjournals.bjps/37.1.71>

- Vermaas, P. (1998). The pros and cons of the Kochen–Dieks and the atomic modal interpretation. En: Dieks, D. y Veermas, P. (eds.). *The modal interpretation of quantum mechanics*. Dordrecht: Kluwer: pp. 103–148. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5084-2_5
- Vermaas, P. and Dieks, D. (1995). The modal interpretation of quantum mechanics and its generalization to density operators. *Foundations of Physics* 25: 145-158. <https://doi.org/10.1007/BF02054662>