

EL ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO COMO UNA RELACIÓN INTERNA

Quantum Entanglement as an Internal Relation

MATÍAS DANIEL PASQUALINI ^{a, b}

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

matiaspasqualini@gmail.com

^a Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

^b Instituto de Investigaciones “Dr. Adolfo Prieto”, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

Resumen

La naturaleza metafísica del entrelazamiento cuántico es un tema que ha llamado la atención de los filósofos de la física durante las últimas décadas. El entrelazamiento se ha caracterizado como una relación que no superviene sobre propiedades no relacionales de sus *relata*. Además, el entrelazamiento se ha invocado para apoyar algunas propuestas metafísicas innovadoras, actualmente establecidas en la metafísica de la ciencia, como el estructuralismo, el monismo y, más recientemente, el coherentismo. En este artículo, se defiende una visión no reduccionista respecto a las relaciones internas. Para esto, se hace uso del análisis que Fine realiza de las proposiciones que involucran propiedades esenciales. Asumiendo que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno generalizado, se argumenta que es preferible considerar al entrelazamiento cuántico como una relación interna, en el sentido de relación esencial. El entrelazamiento así considerado puede adaptarse a distintos marcos metafísicos: (1) como una relación interna fundamental se ajusta al estructuralismo; (2) como una relación interna derivada se ajusta al monismo; (3) como una relación de dependencia se ajusta al coherentismo.

Palabras clave: Entrelazamiento cuántico; Relaciones internas; Propiedades esenciales; Estructuralismo; Monismo; Coherentismo.

Abstract

The metaphysical nature of quantum entanglement is a topic that has attracted the attention of philosophers of physics over the last decades. Entanglement has been characterized as a relation that does not supervene on non-relational properties of its *relata*. Furthermore, entanglement has been invoked to support some innovative metaphysical proposals, currently established in the metaphysics of science, such as structuralism, monism, and, more recently, coherentism. In this paper, a non-reductionist view of internal relations is defended. To do so, use is made of Fine's analysis of propositions involving essential properties. Assuming that quantum entanglement is a widespread phenomenon, it is argued that it is preferable to consider quantum entanglement as an internal relation, in the sense of an essential relation. Entanglement thus considered can

be adapted to different metaphysical frameworks: (1) as a fundamental internal relation it fits structuralism; (2) as a derived internal relation it fits monism; (3) as a dependence relation it conforms to coherentism.

Key words: Quantum Entanglement; Internal Relations; Essential Properties; Structuralism; Monism; Coherentism.

1. Introducción

La cuestión de la naturaleza metafísica del entrelazamiento cuántico es un tema que ha llamado la atención de los filósofos de la física durante las últimas décadas. En general, el entrelazamiento cuántico se ha caracterizado como una relación que no superviene sobre las propiedades no relacionales de sus *relata*. Esta característica del entrelazamiento cuántico ha llevado a algunos autores a proponer que, de acuerdo a la mecánica cuántica, la realidad física es fundamentalmente relacional y/u holista (Teller, 1986; Howard, 1989; Healey, 1991; Esfeld, 2004). Además, el entrelazamiento se ha invocado para sustentar algunos marcos metafísicos innovadores, actualmente establecidos en el ámbito de la metafísica de la ciencia, como el realismo estructural óptico (French, 2006, 2010; Ladyman et al., 2007), el monismo (Schaffer, 2010a; 2010b) y, más recientemente, el coherentismo (Calosi & Morganti, 2021). En este artículo se hará referencia al realismo estructural óptico por medio del término “estructuralismo”.

El carácter no superveniente del entrelazamiento puede inducir un análisis de su naturaleza metafísica en términos de relaciones externas, consideradas relaciones no supervenientes, de acuerdo a la caracterización usual de Lewis (1986). El objetivo de este artículo es mostrar que dicho análisis no es el único posible ni el más conveniente. Asumiendo que el entrelazamiento cuántico es un fenómeno generalizado, se propondrá que el entrelazamiento como relación interna captura sus características de manera más adecuada. Para ello, se propone un enfoque no reduccionista respecto a relaciones internas, en el que la noción de internalidad se interpreta en términos de esencia. Dicho enfoque se formaliza haciendo uso de la lógica de la esencia de Fine (1995b). Finalmente, se muestra que el entrelazamiento cuántico como una relación interna puede adaptarse a distintos marcos metafísicos: (1) como una relación interna fundamental se ajusta al estructuralismo; (2) como una relación interna derivada se ajusta al monismo; (3) como una relación interna equivalente a dependencia simétrica se ajusta al coherentismo.

El plan del artículo es el siguiente. En la Sección (2), se presentarán algunos aspectos preliminares de la física y de la metafísica del entrela-

zamiento cuántico. La Sección (3) estará dedicada a la metafísica de las relaciones y de la dependencia ontológica. En (3.1) se presenta la discusión respecto al estatus ontológico de las relaciones internas y se propone su carácter esencial. En (3.2) se propondrán diversos análisis de la noción de dependencia ontológica, útiles para definir formalmente a los marcos metafísicos que se discutirán en la Sección (4). Finalmente, la Sección (4) se ocupa de la naturaleza metafísica del entrelazamiento cuántico. En (4.1) se muestra la inconveniencia de tratar al entrelazamiento como una relación externa. En (4.2) se argumenta en favor del entrelazamiento como una relación interna y, luego de la introducción de algunos presupuestos físicos y mereológicos, se muestra cómo el entrelazamiento como relación interna puede adaptarse al estructuralismo, al monismo y al coherentismo.

2. Preliminares sobre el entrelazamiento cuántico

Considérese el caso más simple de entrelazamiento cuántico, dos fermiones x_1 y x_2 en el estado llamado *singlete*

$$|s_0\rangle_{x_1x_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}|s_U\rangle_{x_1} \otimes |s_D\rangle_{x_2} - \frac{1}{\sqrt{2}}|s_D\rangle_{x_1} \otimes |s_U\rangle_{x_2} \quad (1)$$

El vector $|s_0\rangle$ representa al estado *singlete* del sistema compuesto x_1x_2 , mientras que $|s_U\rangle$ y $|s_D\rangle$ son, respectivamente, los autoestados correspondientes a espín arriba (*spin up*) y espín abajo (*spin down*) de los fermiones x_1 y x_2 . El estado *singlete* $|s_0\rangle$ indica que cuando se realiza una medición de espín en cierta dirección (por ejemplo, z) la probabilidad de encontrar a x_1 espín arriba y a x_2 espín abajo es igual a la probabilidad de encontrar a x_1 espín abajo y a x_2 espín arriba. El estado *singlete* es tal que cada fermión no tiene un estado vector independiente, sino que los autoestados de espín de un fermión están correlacionados con los correspondientes al otro fermión. Esto resulta del hecho de que el estado $|s_0\rangle$ del sistema compuesto x_1x_2 es no factorizable, es decir, no es un producto tensorial de dos autoestados de espín, sino una superposición de dos estados producto, a saber $|s_U\rangle_{x_1} \otimes |s_D\rangle_{x_2}$ y $|s_D\rangle_{x_1} \otimes |s_U\rangle_{x_2}$. De aquí que se considera al estado *singlete* como un estado no separable o entrelazado. La no-factorizabilidad o no-separabilidad de un estado son típicamente consideradas suficientes para que un estado sea entrelazado.

Para pasar del mero formalismo cuántico a consideraciones de índole metafísica, será necesario disponer de una regla que permita asignar propiedades a los objetos a que refieren los sistemas cuánticos. Generalmente,

para cumplir con dicho cometido, se introduce el postulado conocido como “vínculo autoestado-autovalor” (EEL por *eigenstate-eigenvalue link*), que es un postulado interpretativo frecuentemente incluido en las interpretaciones de la mecánica cuántica. (EEL) establece que el objeto correspondiente al sistema x tiene la propiedad P correspondiente al valor o_p del observable O sii el estado $|\psi\rangle$ de x es el autoestado $|o_p\rangle$ correspondiente a aquel autovalor. Formalmente

$$(|\psi\rangle_x = |o_p\rangle_x) \leftrightarrow Px \quad (2)$$

Para el caso de dos fermiones en el estado singlete, de (EEL) se sigue que el sistema compuesto x_1x_2 tiene una propiedad correspondiente al autoestado $|s_0\rangle$ (espín total cero), mientras que los fermiones no tienen propiedades correspondientes a observables dependientes del estado. Sin embargo, los fermiones están relacionados de tal manera que resulta posible especificar un conjunto de conexiones entre propiedades, correspondientes a las correlaciones entre los valores de espín. Es decir, la relación entre los fermiones entrelazados es tal que si, tras una medición, un fermión está espín arriba el otro fermión estará necesariamente espín abajo. A saber

$$R^{\text{sym}}x_1x_2 \equiv (Ux_1 \leftrightarrow Dx_2) \wedge (Dx_1 \leftrightarrow Ux_2) \quad (3)$$

donde $R^{\text{sym}}x_1x_2$ representa a una relación simétrica de entrelazamiento, U y D son predicados monádicos correspondientes a las propiedades *spin up* y *spin down* respectivamente, $Ux_1 \leftrightarrow Dx_2$ y $Dx_1 \leftrightarrow Ux_2$ representan a las conexiones entre propiedades, a las que se podría otorgar carácter modal. Debe advertirse que, llegado este punto, se ha pasado de una caracterización del entrelazamiento como una propiedad del estado del sistema compuesto a una relación entre sus subsistemas. La peculiaridad del entrelazamiento estriba en que, aunque $R^{\text{sym}}x_1x_2$ sea el caso, Ux_1 , Dx_1 , Ux_2 y Dx_2 no son el caso, al menos mientras los subsistemas involucrados permanezcan entrelazados. De aquí que duplicar cada *relatum* junto con todas sus propiedades no relacionales y relaciones espacio-temporales no es suficiente para obtener la relación de entrelazamiento. Esto es, $R^{\text{sym}}x_1x_2$ no puede supervenir sobre Ux_1 , Dx_1 , Ux_2 y Dx_2 . Esto se corresponde con el hecho que no es posible asignar estados a los subsistemas a partir de los cuales el estado del sistema compuesto se pueda derivar.

Esta característica del entrelazamiento cuántico, que puede parecer sorprendente, ha llevado a algunos autores en décadas pasadas a sugerir

que la realidad a que refiere la mecánica cuántica es fundamentalmente relacional y/u holista. Se debe a Teller (1986) la caracterización del entrelazamiento como una relación no superveniente. De acuerdo al autor, las relaciones de entrelazamiento son relaciones “inherentes” que dan lugar a una forma de holismo relacional. De manera similar, Esfeld señala que hay propiedades del todo que indican la manera en que las partes están relacionadas unas con otras (2004, p. 611). En el ejemplo que se ha presentado de dos fermiones en singlete, esta apreciación de Esfeld significa que la propiedad del sistema compuesto correspondiente al autoestado $|s_0\rangle$ está de alguna manera asociada con la relación de entrelazamiento $R^{\text{sym}}_{x_1 x_2}$ que se da entre los subsistemas.

A continuación, se mencionan algunas características del entrelazamiento cuántico que deberán ser tenidas en cuenta en las secciones siguientes. En primer lugar, el entrelazamiento es una relación irreflexiva y simétrica. Dado que las propiedades de un único sistema están necesariamente correlacionadas, el entrelazamiento no puede ser reflexivo sin volverse trivial, ya que todo estaría entrelazado consigo mismo. Por lo tanto, el entrelazamiento debe considerarse una relación irreflexiva. Además, el entrelazamiento no es una relación unidireccional, sino simétrica. Si un sistema cuántico x_1 está entrelazado con x_2 , entonces necesariamente x_2 también está entrelazado con x_1 . Esto es cierto no solo cuando los sistemas cuánticos son indistinguibles, sino también en casos en los que no lo son.

En segundo lugar, lo dicho sobre el entrelazamiento para sistemas bipartitos (como en el caso de dos fermiones en estado singlete considerado anteriormente) puede extenderse a casos multipartitos, pero con ciertas precauciones. Al tratar con casos multipartitos, se debe distinguir entre entrelazamiento genuino y entrelazamiento resultante de la aplicación del postulado de simetrización (ver Ghirardi et al., 2002). En otras palabras, la mera no factorización del estado no garantiza entrelazamiento genuino. Aquí, “entrelazamiento genuino” se define como aquel que viola las desigualdades de Bell. Según el teorema de Bell (1964), las correlaciones estadísticas deben cumplir ciertas desigualdades si existieran variables ocultas locales que determinaran los resultados. La investigación empírica mostró que estas desigualdades no se cumplen en caso de entrelazamiento cuántico genuino (Aspect et al. 1982). A su vez, es posible obtener estados no separables que satisfacen las desigualdades de Bell mediante la aplicación del postulado de simetrización, que es obligatorio en el caso de partículas indistinguibles. Mientras que el entrelazamiento genuino usualmente supone interacciones previas entre sistemas entrelazados, las partículas indistinguibles pueden no haber interactuado y aun así encontrarse en un estado no separable.

En tercer lugar, se debe considerar una particularidad que puede tener lugar incluso en caso de entrelazamiento genuino. Bigaj (2012) presenta un ejemplo en el que un sistema compuesto de tres subsistemas x_1 , x_2 y x_3 está en un estado no separable y, sin embargo, x_1 y x_3 no están entrelazados entre sí

$$|\psi\rangle_{x_1x_2x_3} = \frac{1}{2}(|0\rangle_{x_1}|1\rangle_{x_2}|2\rangle_{x_3} + |0\rangle_{x_1}|3\rangle_{x_2}|0\rangle_{x_3} + |1\rangle_{x_1}|0\rangle_{x_2}|2\rangle_{x_3} + |1\rangle_{x_1}|2\rangle_{x_2}|0\rangle_{x_3}) \quad (4)$$

Aquí, $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|2\rangle$ y $|3\rangle$ agotan el espacio de estados de cada subsistema (se ha omitido $\otimes$ por simplicidad). Como se puede leer directamente del estado en la ec. (4), x_1 solo puede tomar valores (0) y (1), x_3 solo puede tomar valores (0) y (2), y x_2 puede tomar cualquier valor posible (0), (1), (2) y (3). El estado muestra que

- (a) El valor (0) de x_1 se correlaciona con los valores (1) y (3) de x_2 ; y el valor (1) de x_1 con (0) y (2) de x_2 .
- (b) El valor (0) de x_3 se correlaciona con los valores (2) y (3) de x_2 ; y el valor (2) de x_3 con (0) y (1) de x_2 .
- (c) Entre los valores posibles de x_1 y x_3 , cualquier combinación posible es admisible.

El punto (c) nos indica que no hay correlaciones estadísticas entre x_1 y x_3 . Por lo tanto, x_1 y x_3 no están entrelazados. Se puede extraer una lección sobre la naturaleza metafísica del entrelazamiento a partir de este hecho. Si de $Rx_1x_2 \wedge Rx_2x_3$ no se sigue Rx_1x_3 (donde R es la relación de entrelazamiento), entonces la relación de entrelazamiento no es transitiva.

En cuarto lugar, aunque el entrelazamiento es relativo a la partición o estructura producto tensorial que se adopte (Earman, 2015), el mismo no es relativo a los observables. Si un estado, expresado como una combinación lineal de autoestados pertenecientes a cierto observable, está entrelazado, no es posible tomar una base correspondiente a otro observable y, dejando fija la partición, reescribir el estado de tal manera que resulte ser un producto tensorial. Esto resulta del hecho de que no es posible asignar un estado vector a un subsistema entrelazado (técnicamente, su estado es una mezcla impropia). Como resultado, los sistemas cuánticos no solo están entrelazados con respecto, por ejemplo, a la base de espín, sino que están entrelazados en general. En un estudio reciente, Cinti et al. (2022) muestran que el entrelazamiento no puede ser reducido a un conjunto de múltiples relaciones relativas a los observables. Por ejemplo, si los sistemas tienen observables espín y posición, el entrelazamiento no se puede descomponer, sin pérdida de información, en una relación de entrelazamiento que conecta

los espines y otra que conecta las posiciones. Como resultado de este estudio, el entrelazamiento tiene que ser considerado una relación única multigrado. Es decir, admite cualquier número de *relata* pero no puede descomponerse en una serie de relaciones de menor aridad (ya que el entrelazamiento no es transitivo) o en un conjunto de relaciones indexadas a los observables. Este punto es importante porque permite clarificar cierta duda escéptica que Calosi y Morganti (2021) alzan contra el estructuralismo (cuestión a tratar en la Sección 4.2.2).

Concluyendo la presente sección, se llega a una primera caracterización del entrelazamiento cuántico como una relación no superveniente, irreflexiva, simétrica, no transitiva, multigrado y única. Estos son aspectos metafísicos del entrelazamiento que pueden tomarse como determinados por la física misma. En lo que sigue, se estudiarán otros aspectos de la metafísica del entrelazamiento que podrían admitir adaptación a diferentes marcos metafísicos. Ello nos lleva a estudiar ciertas condiciones generales de la metafísica de las relaciones y de la dependencia ontológica.

3. Aspectos de la metafísica de las relaciones y de la dependencia ontológica

3.1. Las relaciones internas como relaciones esenciales

Las relaciones pueden ser caracterizadas y clasificadas de acuerdo a diversos criterios (ver MacBride, 2020). Por ejemplo, se puede evaluar a las relaciones de acuerdo a su carácter fundamental o derivado, o, en otros términos, de acuerdo a su carácter no superveniente o superveniente. De acuerdo a Lewis (1986), una relación que superviene sobre las propiedades intrínsecas de sus *relata* es considerada interna, mientras que si la relación no superviene sobre las propiedades intrínsecas de sus *relata* es considerada externa. La definición de Armstrong (1978) es similar: una relación necesitada por las naturalezas intrínsecas de sus *relata*, se considera interna. Cleland (1984) propuso una distinción entre relaciones débilmente no supervenientes y fuertemente no supervenientes. De acuerdo a la autora, una relación diádica R entre x_1 y x_2 es fuertemente superveniente sobre la propiedad intrínseca P si

(1) no es posible que Rx_1x_2 y que x_1 y x_2 no instancien P

(2) de Rx_1x_2 se sigue que x_1 y x_2 instancian P y de $P_i x_1$ y $P_j x_2$ se sigue Rx_1x_2

P_i y P_j representan distintas instancias de P . De acuerdo a Cleland, la relación R es fuertemente no superveniente si tanto las condiciones (1) como

(2) resultan no satisfechas, mientras que es débilmente no superveniente si solo (2) resulta no satisfecha (ver también French & Krause, 2006, p. 165). Es de notar que mientras autores como Teller (1986) y Esfeld (2004) han empleado la noción de Cleland para dar cuenta de la metafísica de las relaciones de entrelazamiento, esta noción fue originalmente propuesta por Cleland para dar cuenta de relaciones típicamente consideradas externas, como la relación de distancia espacial.

Como puede apreciarse, en general se ha considerado a las relaciones internas como supervenientes y por tanto reducibles a propiedades no relacionales y solo a las externas como no supervenientes o fundamentales. Probablemente, las definiciones a las que se acaba de aludir dependen de un compromiso previo con cierta visión reduccionista respecto a las relaciones internas. Este hecho responde a que, en general, en marcos metafísicos que se podrían llamar “particularistas”, basados en hechos particulares u objetos individuales (los estructuralistas los llamarían “metafísicas orientadas a objetos”), no hay lugar para relaciones en la ontología fundamental, a excepción de un mínimo de casos reconocidos como relaciones externas. Por ejemplo, en la tesis metafísica conocida como “superveniencia humeana” (Lewis, 1986), solo se aceptan como fundamentales a las relaciones espacio-temporales. Las relaciones internas, en estos marcos metafísicos, son consideradas derivadas a causa de una tácita adhesión a cierto principio “particularista” según el cual, en el nivel fundamental, toda propiedad intrínseca o esencial es monádica.

Sin embargo, yendo más atrás en la historia, se pueden encontrar otras definiciones de las relaciones internas. Por ejemplo, de acuerdo a Moore (1919), una relación es interna si se sigue de la existencia de sus *relata*. Nótese que la definición de Moore permite considerar a las relaciones internas como al menos tan fundamentales como las propiedades no relacionales de sus *relata*, ya que aquí las relaciones internas se siguen solamente de la existencia de los *relata* y no de sus propiedades no relacionales. El sentido de internalidad puesto en juego en la definición de Moore no está, por tanto, asociado a su estatus fundamental o derivado, sino más bien emparentado con la noción de esencialidad. La diferencia entre la definición de Moore y las de Armstrong y Lewis estriba en que estos últimos pertenecen a una generación de metafísicos para los cuales la discusión respecto al estatus de las relaciones internas en favor del reduccionismo ya había quedado saldada. Por el contrario, la posición más moderada de Moore refleja su pertenencia a una generación de metafísicos para los cuales la discusión entre particularismo y holismo (o entre particularismo y holismo monista) y el estatus fundamental o derivado de las relaciones internas continuaba activa.

Esta cuestión de interés histórico fue reintroducida en discusiones recientes por Schaffer (2010a; 2010b), a quien se lo reconoce por su defensa de una forma moderada de monismo que se considerará en la Sección (4.2.3). Las reflexiones de este autor respecto al debate que tuvo lugar a fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX entre neohegelianos (defensores de un holismo monista) y los primeros filósofos analíticos (defensores del particularismo) permiten esclarecer la razón por la cual se adoptó una actitud reduccionista respecto a las relaciones internas. En efecto, si las relaciones internas en cuanto relaciones esenciales son solamente derivadas y no fundamentales, entonces la metafísica particularista prevalece por sobre formas de metafísica holistas. Pero si se les permite a las relaciones internas, en cuanto relaciones esenciales, ser al menos tan fundamentales como las propiedades no relacionales de sus *relata*, entonces los objetos internamente relacionados serían fundamentalmente totalidades integradas, desdibujándose así la visión particularista (más detalles sobre este tipo de argumentación en la Sección 4.2.3).

A continuación, se propone un análisis no reduccionista de las relaciones internas. Se corre de un primer plano la consideración de si las relaciones internas son o no fundamentales (en otros términos, si son o no supervenientes). El análisis se centra en las relaciones internas bajo su aspecto de relaciones intrínsecas o esenciales, punto que resulta de la indagación histórica a la que se acaba de referir. Tradicionalmente, se han interpretado a las propiedades esenciales de un individuo como aquellas que se siguen necesariamente de su existencia. Sin embargo, de acuerdo a Fine, las proposiciones que involucran predicados esenciales no pueden reducirse a proposiciones meramente modales. Es decir, para formalizar proposiciones esenciales, el uso del operador modal de necesidad estándar ($\Box$) no resultaría suficiente. No obstante, las proposiciones modales sí son condiciones necesarias de las esenciales. Así, el hecho de que cierta propiedad forma parte de la esencia de x puede explicitarse en términos modales-existenciales de la siguiente manera (Fine, 1994)

$$P^{\text{ess}}x \rightarrow \Box (Ex \rightarrow \exists P(Px)) \quad (5)$$

Aquí, P^{ess} es un predicado esencial monádico y E es el predicado existencial, que puede definirse en términos del cuantificador existencial y la identidad como $Ex \equiv \exists z(z = x)$. La ec. (5) significa que, si P es una propiedad esencial de x , entonces es necesario que si x existe entonces existe una propiedad P tal que Px . Para llegar a definir $P^{\text{ess}}x$ estableciendo una equivalencia, se debe recurrir al operador modal indexado de Fine ($\Box_x$),

que el autor presenta en su lógica de la esencia (1995b) y que significa “es verdadero en virtud de la esencia de x que”

$$P^{\text{ess}}x \equiv \Box_x (Ex \rightarrow \exists P(Px)) \quad (6)$$

La ec. (6) significa que P es una propiedad esencial de x sii es verdadero en virtud de la esencia de x que si x existe entonces existe una propiedad P tal que Px . La expresión $\Box_x (Ex \rightarrow \exists P(Px))$ en la ec. (6) puede simplificarse como $\Box_x Px$, expresión que debe leerse: “es verdadero en virtud de la esencia de x que Px ”. Así $P^{\text{ess}}x$, significando “ x es esencialmente P ”, o “ P es una propiedad esencial de x ”, puede formalizarse sencillamente por medio de la expresión $\Box_x Px$. Esto es

$$P^{\text{ess}}x \equiv \Box_x Px \quad (7)$$

Para un predicado esencial diádico, es decir, para una relación interna R^{int} , se propone en este artículo el siguiente análisis

$$R^{\text{int}}x_1x_2 \equiv \Box_{x_1} Rx_1x_2 \equiv \Box_{x_1} (Ex_1 \rightarrow \exists R(Rx_1x_2)) \quad (8)$$

Esto es, x_1 está internamente R -relacionado con x_2 sii es verdadero, en virtud de la esencia de x_1 , que si x_1 existe entonces existe una relación R tal que Rx_1x_2 . Para una relación interna simétrica, el análisis que se propone es

$$R^{\text{int,sym}}x_1x_2 \equiv \Box_{x_1x_2} Rx_1x_2 \equiv \Box_{x_1x_2} (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists R^{\text{sym}}(Rx_1x_2)) \quad (9)$$

Esto es, x_1 y x_2 están internamente R -relacionados sii es verdadero, en virtud de las esencias de x_1 y de x_2 , que si x_1 y x_2 existen entonces existe una relación simétrica R tal que Rx_1x_2 . En la ec. (9), como puede apreciarse, la existencia de R se sigue de la existencia de sus dos *relata*. En adelante, se toma $\Box_{x_1x_2} Rx_1x_2$ como la expresión formal más sencilla para representar el hecho de que x_1 y x_2 están internamente relacionados por la relación simétrica R . De esta manera, se obtiene una definición no reduccionista de las relaciones internas, en la que la internalidad queda asociada no a un supuesto carácter superveniente sino a su carácter esencial. Como podrá comprobarse en la Sección (4), este análisis resultará de utilidad para argumentar en favor de la conveniencia de considerar al entrelazamiento como una relación interna en los marcos estructuralista, monista y coherentista.

3.2. La noción de dependencia ontológica

A continuación, se presentará la noción de dependencia ontológica. Los marcos metafísicos mencionados se distinguen crucialmente por la estructura de relaciones de dependencia ontológica que estos postulan. Se adelanta que, en el estructuralismo, lo fundamental son las relaciones y los objetos particulares son dependientes de ellas; en el monismo, lo fundamental es el todo y los objetos particulares son dependientes de este; en el coherentismo, los objetos particulares dependen simétricamente unos de otros. En la metafísica particularista u orientada a objetos, los objetos particulares son los fundamentales, siendo sus relaciones internas y el todo que ellos constituyen entidades dependientes.

Se detallan algunas características de la noción. En primer lugar, la dependencia ontológica es una relación que tiene a los objetos particulares concretos como *relata*. También se ha propuesto que sus *relata* pueden pertenecer a categorías ontológicas diferentes, por ejemplo, particulares y relaciones entre particulares. Ese es el caso del estructuralismo, en el que los particulares concretos dependen ontológicamente de las relaciones que se dan entre ellos. Por el contrario, en el particularismo, son las relaciones internas las que dependen de los particulares concretos relacionados. En segundo lugar, la mayoría de los metafísicos consideran que la dependencia ontológica es una relación asimétrica. Ese es el caso en el estructuralismo, en el monismo y en el particularismo. Sin embargo, la dependencia ontológica también puede ser concebida como una relación simétrica, tal como ocurre en el coherentismo.

Otro presupuesto generalmente asociado a la noción de dependencia ontológica es el llamado fundacionalismo metafísico (WF por *well-foundedness*). La dependencia asimétrica, por su carácter irreflexivo y transitivo, induce un orden parcial entre objetos particulares o entre distintos niveles de objetos particulares. Si la dependencia está bien fundada, entonces hay un nivel último de objetos particulares, considerados absolutamente fundamentales o básicos, en el que las cadenas de dependencia llegan a su fin. Calosi (2014) formaliza (WF) de la siguiente manera

$$Bx \vee \exists y (By \wedge Dxy) \quad (10)$$

B es la propiedad de ser un objeto básico y D un predicado binario correspondiente a la dependencia ontológica. La ec. (10) significa: el objeto x es básico o existe un objeto y que es básico de modo que x depende ontológicamente de y . Estos objetos básicos pueden encontrarse en cualquier nivel de la jerarquía mereológica. Si están en el nivel inferior, (WF) se asocia a

una forma de particularismo atomista. Si el objeto básico está en el nivel superior, el todo único, entonces (WF) se asocia a una forma de holismo monista. Recuérdesse que la dependencia ontológica también puede tener *relata* pertenecientes a diferentes categorías ontológicas. Por tanto, es posible que las cadenas de dependencia terminen en una estructura básica, como en el estructuralismo. Si se rechaza (WF), las cadenas de dependencia pueden extenderse indefinidamente (infinitismo). Si se rechaza (WF) y se admite dependencia recíproca o simétrica, entonces las cadenas de dependencia pueden volver sobre sí mismas, formando bucles, como en el caso del coherentismo.

Aunque algunos metafísicos consideran que la noción de dependencia ontológica es primitiva y, por ende, no analizable, simplemente un predicado binario D (ver Schaffer, 2009), existen varias propuestas para llevar a cabo dicho análisis. En primer lugar, se menciona el análisis modal-existencial de la dependencia ontológica (ver Tahko & Lowe, 2020)

$$D^{\text{mod}} x_1 x_2 \equiv \Box (Ex_1 \rightarrow Ex_2) \quad (11)$$

La ec. (11) nos está diciendo que x_1 depende de x_2 sii necesariamente si x_1 existe entonces x_2 existe. De acuerdo a Fine, en su artículo sobre dependencia ontológica (1995a), el análisis modal-existencial es demasiado débil para dar cuenta de la noción de dependencia ontológica, y, consecuentemente, está expuesto a contraejemplos, como la dependencia de Sócrates respecto a su singleton. Fine entonces sugiere que la dependencia ontológica debería ser analizada en términos más restrictivos y que la noción debería quedar atada a la esencia del objeto dependiente. Así

$$D^{\text{ess}} x_1 x_2 \equiv \Box_{x_1} (Ex_1 \rightarrow Ex_2) \quad (12)$$

En la ec. (12), a diferencia de la ec. (11), se ha introducido el operador modal indexado $(\Box_{x_1})$, propio de la lógica de la esencia de Fine (1995b), para indicar que la necesidad se da aquí en virtud de la esencia de x_1 . La ec. (12) representa el análisis esencial-existencial provisto por Fine de la noción de dependencia ontológica. Nótese el parentesco entre este análisis de la dependencia y el análisis de la propiedad esencial monádica en la ec. (6). Esta similitud formal nos estaría indicando que, bajo este análisis de la dependencia, la existencia del objeto independiente (x_2) cuenta como una propiedad esencial del objeto dependiente (x_1).

Finalmente, se menciona al llamado análisis basado en la identidad, que se debe originalmente a Lowe (1998), con elaboraciones más recientes en Tahko y Lowe (2020). La idea detrás de esta propuesta es hacer descan-

sar la noción de dependencia ontológica no tanto en la existencia de las entidades involucradas sino en sus respectivas identidades. La identidad aquí involucrada no es numérica sino cualitativa. Por tanto, el perfil cualitativo del objeto dependiente quedaría esencialmente relacionado con el perfil cualitativo del objeto independiente. Calosi (2020) propone dos maneras de formalizar dicho análisis

$$D^{\text{id-1}}x_1x_2 \equiv \Box_{x_1}(Ex_1 \rightarrow Ex_2 \wedge \exists R(Rx_1x_2)) \quad (13)$$

$$D^{\text{id-2}}x_1x_2 \equiv \Box_{x_1}(Ex_1 \rightarrow \exists R(Rx_1x_2)) \quad (14)$$

En la ec. (13), x_1 depende de x_2 sii, en virtud de la esencia de x_1 , de la existencia de x_1 se sigue la existencia de x_2 y la existencia de una relación entre x_1 y x_2 . En la ec. (14), en virtud de la esencia de x_1 , de la existencia de x_1 se sigue solo la existencia de la relación entre x_1 y x_2 (ya no la existencia de x_2). Nótese el parentesco entre el análisis de la dependencia en la ec. (14) y el análisis de la propiedad esencial binaria en la ec. (8). Esta similitud formal nos estaría indicando que, bajo este análisis de la dependencia, un objeto es dependiente porque está internamente relacionado con otro. De aquí que la dependencia ontológica y la relación interna asimétrica podrían considerarse equivalentes, al menos de acuerdo a la interpretación que en este artículo se hace de las relaciones internas. Sugestivamente, el mismo Calosi (2020) propone (en una nota a pie) una tercera, más simple, formulación de este análisis, en la que el predicado existencial no está directamente involucrado. A saber

$$D^{\text{id-3}}x_1x_2 \equiv \Box_{x_1}\exists R(Rx_1x_2) \quad (15)$$

Aunque equivalente con $D^{\text{id-2}}$ (ver ec. 8), $D^{\text{id-3}}$ hace que la equivalencia entre dependencia ontológica y relación interna asimétrica sea todavía más clara.

Antes de continuar, se destacan algunas conclusiones parciales que se desprenden del trabajo realizado en esta sección:

- (1) Se obtuvo una comprensión de las relaciones internas como relaciones esenciales y se encontraron medios formales para expresarlas.
- (2) Se puso en evidencia que el carácter fundamental o derivado de las relaciones internas depende del marco metafísico adoptado. Si se rechaza la metafísica particularista, se las puede considerar fundamentales.
- (3) Quedaron a disposición varios análisis de la noción de la dependencia ontológica. En particular, se encontró que el análisis basa-

do en la identidad puede tener conexiones estrechas con la noción de internalidad.

4. La naturaleza metafísica del entrelazamiento

En la presente sección, sobre la base de las características del entrelazamiento ya explicitadas en la Sección (2), se acomete la cuestión de la naturaleza metafísica del entrelazamiento respecto a diversos marcos metafísicos. Primeramente, se muestra la inconveniencia de considerar al entrelazamiento como una relación externa dentro de un marco metafísico particularista. Luego, se argumenta a favor de su tratamiento como relación interna. Por último, se procura mostrar cómo el entrelazamiento en cuanto relación interna puede ajustarse a diversos marcos metafísicos: el estructuralismo, el monismo y el coherentismo.

4.1. *Entrelazamiento como una relación externa*

En esta subsección, se pretende mostrar que, aunque es posible considerar al entrelazamiento como una relación externa, tal y como vendría requerido por un marco metafísico particularista, dicho tratamiento resulta, por ciertas razones, inconveniente. La metafísica particularista u orientada a objetos, instanciada, por ejemplo, en la tesis conocida como “superveniencia humeana” (Lewis, 1986), fue dominante durante la mayor parte del siglo pasado. Sin embargo, la naturaleza metafísica del entrelazamiento, en especial su carácter no superveniente, le impone un serio desafío. En dicho marco, las relaciones admitidas en la base de superveniencia son únicamente las relaciones externas. En efecto, relaciones internas en la base harían que los hechos modales se tornen no supervenientes y los objetos básicos dependientes unos de otros. Por tanto, relaciones internas en la base irían contra el *dictum* de Hume, según el cual todo objeto básico es modalmente libre. En consecuencia, el cuadro metafísico provisto por el particularismo colapsaría hacia el holismo. De aquí que, en este marco metafísico, el entrelazamiento, por su carácter no superveniente, deberá ser acomodado como una relación externa incorporada en la base de superveniencia, junto con las relaciones espacio-temporales. Este movimiento tiene el aspecto de una salida conservadora para lidiar dentro de dicho marco con la desafiante naturaleza metafísica del entrelazamiento. Algunos proponentes de la superveniencia humeana, incluso el mismo Lewis, consideran esta solución (ver, por ejemplo, Darby, 2012). Bajo este enfoque, el entrelazamiento podría incluso tomar el lugar de la relación constitutiva del mundo (la *world-making relation*, ver Jaksland, 2021).

Sin embargo, esta posible solución comporta ciertos problemas. En primer lugar, las relaciones externas no parecen ser capaces de soportar constricciones modales sobre sus *relata* del tipo que requiere la relación de entrelazamiento. De hecho, las relaciones espacio-temporales típicamente admitidas en la base de superveniencia en general no constriñen modalmente a sus *relata*. Por ejemplo, se admite que la posición espacial de un objeto básico es independiente de la posición de otro objeto básico. Si se acepta que la relación de entrelazamiento es una relación externa que constriñe modalmente, entonces se está aceptando un tipo de modalidad básica o primitiva que va contra el *dictum* de Hume. En segundo lugar, la solución propuesta añade *ad hoc* un nuevo ítem a la ontología básica, en un movimiento que puede parecer poco parsimonioso. En tercer lugar, se ha visto en la Sección (2) que la relación de entrelazamiento no es transitiva y por tanto no puede descomponerse en una serie de relaciones diádicas. Forzosamente, debe concebirse como una relación que involucra a la vez a todos sus *relata*, de modo más o menos “global”. Contrariamente, en la superveniencia humeana, todo lo básico es de alguna manera local y particular. Por tanto, introducir en la ontología básica un ítem global puede hacer que el cuadro metafísico provisto por la superveniencia humeana parezca incoherente (ver Darby, 2012). En suma, el intento de acomodar al entrelazamiento como a una relación externa dentro de un marco metafísico particularista u orientado a objetos parece poco prometedor.

4.2. *Entrelazamiento como una relación interna*

Quizás el hecho de que el entrelazamiento es una relación no superveniente no debe tomarse como una indicación de que se trata de una relación externa. Aceptar el entrelazamiento, por su carácter no superveniente, como una relación externa, viene forzado por el hecho de que se ha adoptado previamente una metafísica de las relaciones reduccionista, en el marco de una metafísica particularista, orientada a objetos. Si se sale de ese marco y se traza la distinción entre relaciones externas o internas no a partir de su estatus fundamental o derivado sino a partir de su carácter no esencial o esencial (o por su fuerza modal, si la noción de esencia parece demasiado metafísicamente cargada, ver Sección 3.1), entonces se hace posible concebir al entrelazamiento como una relación interna. En contraste con las relaciones externas, las relaciones internas, por su carácter esencial, pueden naturalmente dar lugar a las conexiones modales típicas del entrelazamiento. En efecto, dado que las proposiciones esenciales son más fuertes que las modales, del análisis de las relaciones internas simétricas provisto en la ec. (9) se sigue

$$R^{\text{int,sym}} x_1 x_2 \rightarrow \Box (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists R^{\text{sym}} (Rx_1 x_2)) \quad (16)$$

A partir de la equivalencia propuesta en la ec. (3), se puede reemplazar $Rx_1 x_2$ en el consecuente de la ec. (16) por $(Ux_1 \leftrightarrow Dx_2) \wedge (Dx_1 \leftrightarrow Ux_2)$. Así, para el caso del entrelazamiento que resulta del estado singlete, se obtiene

$$R^{\text{int,sym}} x_1 x_2 \rightarrow \Box (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists U \exists D ((Ux_1 \leftrightarrow Dx_2) \wedge (Dx_1 \leftrightarrow Ux_2))) \quad (17)$$

Nótese que, según la ec. (17), del entrelazamiento que resulta de un estado singlete considerado como relación interna se sigue que, necesariamente, de la existencia de los sistemas se sigue la existencia de ciertas propiedades tales que se dan las correlaciones asociadas a dicho tipo específico de entrelazamiento. La ec. (17) exhibe el carácter modal de las conexiones entre las propiedades de los sistemas entrelazados. El esquema aquí presentado podría generalizarse para relaciones de entrelazamiento distintas de la que resulta del estado singlete. Esto permite sugerir que el entrelazamiento debe ser preferiblemente concebido como un tipo de relación interna, ya que así pueden sustentarse naturalmente las conexiones modales a él asociadas.

4.2.1. Presupuestos físicos y mereológicos

Antes de avanzar con la explicación detallada respecto a cómo el entrelazamiento en cuanto relación interna se ajusta tanto al estructuralismo como al monismo y al coherentismo, es necesario dar breve cuenta de ciertos presupuestos requeridos por algunos de estos marcos metafísicos. Como se ha hecho explícito en la ec. (16), una de las condiciones necesarias para que el entrelazamiento pueda ser considerado una relación interna es que tenga lugar de modo necesario entre sistemas cuánticos. En consecuencia, se tiene que suponer que el entrelazamiento es un fenómeno generalizado que afecta a todos los sistemas cuánticos del universo. Esto se relaciona con la hipótesis física de un “universo entrelazado” (EU por *entangled universe*). Calosi (2014) plantea la tesis en estos términos

(EU) Existe un estado cuántico del universo y es un estado entrelazado.

Aunque plausible, esta suposición es controversial. En su favor, está el hecho de que la dinámica de la mecánica cuántica (la ecuación de Schrödinger) preserva el entrelazamiento. Es decir, un estado cuántico entrela-

zado no puede evolucionar espontáneamente hacia un estado separable. Además, en general, las interacciones dan como resultado estados entrelazados. Esto permite suponer que el estado del universo es entrelazado o eventualmente llegará a esa condición. Sin embargo, algunas interpretaciones muy influyentes (entre ellas, la llamada interpretación ortodoxa) postulan para ciertas circunstancias la ocurrencia de “colapsos”, es decir saltos no unitarios desde superposiciones a autoestados, haciendo que los sistemas cuánticos se desentrelacen. De aquí que (EU) resulte sensible a la interpretación de la mecánica cuántica que se elija adoptar.

Estrictamente hablando, para poder considerar al entrelazamiento como una relación interna, no solo es necesario (EU), sino una forma más fuerte de dicho presupuesto. En efecto, deben excluirse los estados entrelazados como el propuesto por Bigaj (2012) (ver Sección 2). Recuérdese que es posible que un sistema multipartito tenga un estado entrelazado en el que, sin embargo, dos de los subsistemas no estén entrelazados (ver ejemplo en la ec. 4). De ser así, para estos subsistemas en particular, el entrelazamiento no podría ser una relación esencial. Por lo tanto, se requiere una versión más fuerte de (EU). En términos de Calosi (2014)

(EU*) Existe un estado cuántico del universo y es un estado entrelazado genuino multipartito.

Este principio postula no solo que el estado del universo está entrelazado, sino también que cada objeto concreto está entrelazado con todos los demás objetos concretos. La tesis es más fuerte y, por tanto, más controversial que (EU). Sin embargo, el entrelazamiento es conocido por su capacidad de preservarse entre objetos muy distantes. Esto, junto con ciertos escenarios cosmológicos comúnmente aceptados, donde el universo comienza en una singularidad, hace que este presupuesto sea todavía plausible. (EU*), por tanto, va a ser requerido cada vez que se quiera defender al entrelazamiento como a una relación interna.

El monismo requiere dos principios mereológicos adicionales. El primero es el principio de la composición irrestricta (UC por *unrestricted composition*)

(UC) Para todo conjunto no vacío de objetos existe un objeto que es la suma mereológica de aquellos.

En un marco metafísico monista, (UC) asegura que existe un objeto que es la suma mereológica de todos los particulares concretos, al que llamamos universo. El segundo principio requerido por el monismo podría

traducirse a nuestra lengua como “restricción de teselado” (TC por *tiling constraint*) (Calosi, 2014)

(TC) El universo es una suma mereológica de entidades básicas mereológicamente disyuntas.

La adopción de (TC) es necesaria para que la opción entre el monismo y particularismo sea decidible. En efecto, de (TC) se sigue que si el universo es básico entonces nada más puede serlo. No es necesario ahondar más aquí en el sentido de estos principios. El lector interesado podrá profundizar en la bibliografía sobre monismo (Schaffer, 2010a, 2010b; Calosi, 2014).

4.2.2. *Entrelazamiento en el estructuralismo*

Se evalúa a continuación cómo el entrelazamiento concebido como una relación interna se adapta al estructuralismo. Este marco metafísico viene ganando reconocimiento en el área de la metafísica de la ciencia desde hace ya algunos años, convirtiéndose en un rival de importancia de la tradicional metafísica particularista orientada a objetos. El estructuralismo considera que los objetos particulares concretos dependen asimétricamente de una estructura considerada fundamental. Esta estructura queda conformada precisamente por un conjunto de relaciones que median entre dichos objetos. En este marco metafísico, las relaciones son concebidas como más fundamentales que sus *relata*, resultando los objetos meros nodos o puntos de intersección en la estructura. El entrelazamiento, en cuanto relación no superveniente, puede naturalmente ocupar el lugar de la estructura fundamental dentro de este marco metafísico. Calosi y Morganti (2021) proponen una formalización del estructuralismo en la que hacen uso del análisis esencial-existencial de la noción de dependencia ontológica (ver ec. 12). Por simplicidad, supóngase que el universo es bipartito, existiendo en él solo dos objetos x_1 y x_2 . El estructuralismo, entonces, propone que

$$\Box_{x_1 x_2} (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists R^{\text{irr}, \text{sym}} (Rx_1 x_2)) \quad (18)$$

donde R toma el lugar de la estructura fundamental. En esta formulación, D^{ess} es una relación que toma como término dependiente a los objetos x_1 y x_2 y a la estructura R como término independiente.

En este marco, el entrelazamiento es ventajosamente considerado una relación interna, ya que, de la internalidad de la estructura, se puede inferir la existencia de una relación de dependencia asimétrica entre objetos y estructura, tal y como requiere esta forma de estructuralismo (existen

formas moderadas en las que la estructura y los objetos están en paridad ontológica). Considérese que, de nuestro análisis de la relación interna simétrica (ec. 9), se sigue

$$R^{\text{int, sym}} x_1 x_2 \rightarrow \Box_{x_1 x_2} (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists R^{\text{sym}} (Rx_1 x_2)) \quad (19)$$

Nótese que el consecuente en la ec. (19) se aproxima a la expresión formal del estructuralismo que se propone en la ec. (18). Solo se añade en la ec. (18) que la estructura es una relación irreflexiva, condición que resulta satisfecha si se acepta que la estructura se identifica con la relación de entrelazamiento, que se considera irreflexiva (ver Sección 2). Esto indica que, a partir del entrelazamiento como una relación interna, se puede construir un argumento en favor de esta forma de estructuralismo. McKenzie (2014) arriba a la misma conclusión, presentando una argumentación similar, en la que el punto de partida es la existencia de relaciones que permiten discernir débilmente entre fermiones indistinguibles y que resultan de la aplicación del postulado de simetrización. De todos modos, si se pretende elaborar una defensa completa de esta forma de estructuralismo, restaría discutir cuál es el estatus ontológico que debería asignarse a las propiedades de los sistemas cuánticos que no dependen del estado y que, por tanto, no podrían estar entrelazadas, tal como la masa, carga, etc. Difícilmente, al menos en mecánica cuántica no relativista, dichas magnitudes admitan una reducción en términos de relaciones. Además, debería introducirse una argumentación conducente a establecer que la dependencia entre objetos y estructura no es recíproca. Es decir, sería necesario excluir la variante moderada del estructuralismo. No es este el lugar apropiado para continuar profundizando en este punto.

Finalmente, se aborda una objeción que plantean Calosi y Morganti (2021). Ellos consideran que tomar al entrelazamiento como la estructura fundamental no alcanza para dar razón de una dependencia rígida entre los objetos y la estructura, sino solo dependencia colectiva genérica. La dependencia colectiva genérica es menos informativa que la dependencia rígida. Los autores argumentan que no es posible seleccionar con precisión cuál de las muchas relaciones de entrelazamiento que pueden darse entre un número de sistemas cuánticos es la que soporta la dependencia rígida de los objetos en la estructura. Los autores suponen que el entrelazamiento puede apropiadamente ser explicitado en términos de una pluralidad de relaciones de entrelazamiento, cada una de ellas relativa a un observable en particular. Sin embargo, se ha visto en la Sección (2), que Cinti et al. (2022) mostraron que el entrelazamiento es una relación única que no puede ser relativizada a los observables. Este carácter único de la relación de

entrelazamiento permite establecer dependencia rígida de los objetos en la estructura, disipando así la duda escéptica interpuesta por los mencionados autores.

4.2.3. Entrelazamiento en el monismo

En esta subsección, se estudia la manera en la que la metafísica del entrelazamiento resulta conforme con el monismo. Se comienza haciendo mención de una tesis más débil, el holismo metafísico (ver Calosi, 2014). Esta doctrina defiende que si dos (o más) objetos exhiben conexiones modales, estos no pueden ser básicos sino partes dependientes de un todo común. De acuerdo a Calosi y Morganti (2021), el holismo puede formalizarse de la siguiente manera

$$\Box_{x_1, x_2} (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists u (x_1 << u \wedge x_2 << u)) \quad (20)$$

Aquí, $<<$ representa a la relación de participación mereológica propia (es decir, si $x << u$ entonces x es parte propia de u). Nuevamente, se emplea D^{cs} , es decir, la noción de dependencia ontológica analizada en términos esenciales-existenciales, de modo que x_1 y x_2 dependen de u . Nótese que el todo fundamental en el que dependen un número de particulares concretos puede ser su suma mereológica o un todo más grande del cual los particulares en cuestión son partes propias. Debe enfatizarse que el argumento en favor del holismo depende crucialmente del *dictum* de Hume respecto a la independencia de los objetos básicos, principio compartido por los defensores de los marcos metafísicos particularistas. Recuértese que, de acuerdo a este principio, los objetos básicos deben ser independientes, es decir, no puede haber conexiones modales entre ellos. Por tanto, si se encuentran conexiones modales entre objetos, estos no pueden ser básicos, sino partes de un todo común fundamental. En términos de Ismael y Schaffer (2020) objetos modalmente conectados tienen un *common ground*. El argumento de estos autores es algo más sutil: allí donde hay conexiones modales, al tiempo que no es posible establecer una causa común (*common cause*), entonces hay un *common ground*.

Si aquellas conexiones modales son solo locales, entonces se permanece en una forma de holismo relativamente inocuo. Sin embargo, se encuentra actualmente en metafísica de la ciencia una forma más fuerte de holismo que está ganando cierto reconocimiento en los últimos años. Se trata del monismo de prioridad (PM por *priority monism*), defendido por Schaffer (2010a, 2010b). De acuerdo a (PM), las cadenas de dependencia ontológica están bien fundadas y solo culminan en el universo, la única en-

tividad básica. Frente a tesis monistas radicales que niegan la existencia de pluralidad de particulares concretos, (PM) representa una forma moderada de monismo que acepta la existencia de pluralidad de particulares concretos, aunque les niega su carácter básico. (PM), en cuanto forma fuerte de holismo, requiere que todos los objetos del universo estén modalmente conectados. En este punto, es posible apelar al entrelazamiento o a algún otro tipo de relación física que asegure las conexiones modales requeridas. En uno de los trabajos de Schaffer, se obtiene un universo básico, integrado como una totalidad, a partir del hecho de que “todas las cosas están internamente relacionadas” (2010b). Por supuesto, si se considera que el entrelazamiento toma el lugar de aquella relación interna que conecta modalmente a todas las cosas, entonces se requiere el compromiso con (EU*). Además, por su misma naturaleza, (PM) requiere que exista la suma mereológica de todos los objetos del universo, es decir, se requiere (UC). Además, para asegurar que el universo sea el único objeto básico, se requiere (TC).

Supóngase una vez más, por simplicidad, que el universo tiene solo dos partes, x_1 y x_2 . En cierta continuidad con la ec. (20), la inferencia de (PM) a partir de las relaciones internas que conectan modalmente a todos los objetos, podría formalizarse

$$R^{\text{int,sym}}_{x_1x_2} \rightarrow \Box_{x_1x_2} (Ex_1 \wedge Ex_2 \rightarrow \exists u (u = x_1 + x_2)) \quad (21)$$

Aquí $+$ representa a la suma mereológica y u al universo en su totalidad. $R^{\text{int,sym}}$ es la relación interna de la que Schaffer infiere (PM), que podría hacerse corresponder con el entrelazamiento. El mismo Schaffer no ofrece un análisis de este tipo, ya que toma a la noción de dependencia ontológica como a una noción primitiva, no analizable (Schaffer 2009). Tampoco hay disponibles en la bibliografía intentos de otros autores de analizar (PM) en los términos en los que puede realizarse un análisis de la dependencia ontológica. Por tanto, establecer la validez formal de la ec. (21) permanece como trabajo pendiente.

Antes de cerrar esta subsección, se realizan dos aclaraciones. En primer lugar, para que el argumento de Schaffer funcione, la relación interna en cuestión no necesita ser considerada interna en el sentido más fuerte que se está adoptando aquí, es decir, como relación esencial. Solo se requiere que la relación interna en cuestión imponga restricciones modales a sus *relata*. Por supuesto, el argumento funciona sin problemas si las relaciones internas se consideran relaciones esenciales, ya que las afirmaciones modales se siguen de las afirmaciones esenciales (ver Sección 3.1). En segundo lugar, el entrelazamiento monista puede ser presentado como una relación derivada, en claro contraste con el entrelazamiento estructu-

ralista. Esto se debe a que la relación de entrelazamiento entre las partes puede considerarse necesitada por cierta propiedad monádica del todo. En el ejemplo de los dos fermiones entrelazados proporcionado en la Sección (2), se mencionó que una propiedad asociada con cierto valor (0) de espín total se asigna al sistema compuesto. En el monismo, se puede considerar que la relación de entrelazamiento que resulta del estado singlete depende del espín total (0).

4.2.4. Entrelazamiento en el coherentismo

Por último, se estudia al entrelazamiento en relación al coherentismo. Calosi y Morganti (2021) rechazan cuadros metafísicos jerárquicos en los que las cadenas de dependencia ontológica corren de modo “vertical” desde los objetos al todo fundamental o desde los mismos a una estructura fundamental. Su razón principal para justificar dicho rechazo es que tanto el estructuralismo como el monismo involucran una serie de presupuestos controversiales, como (EU*) y (WF). El monismo, además, requiere los principios mereológicos (UC) y (TC) (ver Sección 4.2.1). Los autores solo admiten relaciones de dependencia ontológica “horizontales”, recíprocas o simétricas, dando lugar a un cuadro metafísico sin jerarquías, el llamado coherentismo. Calosi y Morganti (2021) proponen que el entrelazamiento cuántico es un tipo de relación entre objetos que puede dar sustento a esta tesis metafísica. En el estructuralismo y en el monismo, el entrelazamiento no se considera en sí mismo una relación de dependencia ontológica, sino una relación de la que se siguen relaciones de dependencia asimétrica. Estas relaciones de dependencia asimétrica toman al conjunto de los *relata* de la relación de entrelazamiento como uno de sus términos. El otro término puede ser el todo (en el monismo) o la misma relación de entrelazamiento (en el estructuralismo). El coherentismo evita esta complicación y concibe al entrelazamiento como una relación que equivale a dependencia recíproca, o al menos de la que se sigue dependencia recíproca para los mismos *relata*. La formalización de Calosi y Morganti (2021) del coherentismo es

$$\Box_{x_1}(Ex_1 \rightarrow Ex_2) \wedge \Box_{x_2}(Ex_2 \rightarrow Ex_1) \quad (22)$$

La ec. (22) significa que para x_1 es esencial que x_2 exista y viceversa. Nuevamente, la noción de dependencia puesta en juego aquí es la esencial-existencial (D^{ess}). En la ec. (22) se dan dos relaciones asimétricas recíprocas, cuya conjunción equivale a una relación de dependencia simétrica.

En el marco metafísico provisto por el coherentismo, el entrelazamiento también es ventajosamente considerado una relación interna, ya que puede argüirse que de la internalidad de la relación de entrelazamiento se sigue dependencia recíproca entre sus *relata*. Los mismos Calosi y Morganti (2021) proponen que el entrelazamiento puede ser aceptado como una relación esencial. En su ec. (25), los autores formalizan la relación entre dos objetos entrelazados de la siguiente manera

$$\Box_{x_1 x_2} R x_1 x_2 \quad (23)$$

Ese es exactamente el significado pretendido de la relación interna simétrica de acuerdo a la perspectiva asumida en este artículo. Se puede expresar, en los siguientes términos, que de la relación interna entre dos objetos se sigue dependencia recíproca entre ellos

$$R^{\text{int, sym}} x_1 x_2 \rightarrow D x_1 x_2 \wedge D x_2 x_1 \quad (24)$$

La ec. (24) significa que, si x_1 y x_2 están simétrica e internamente relacionados, entonces se dan relaciones de dependencia recíprocas. Si se acepta que el entrelazamiento es una relación interna y si la ec. (24) es válida, entonces puede tomarse al entrelazamiento como un fenómeno que puede dar sustento al coherentismo. Se evalúa a continuación bajo qué condiciones puede establecerse la validez de la ec. (24). Recuérdesse que en la Sección (3.2) se encontró una estrecha similitud entre la noción de internalidad y la dependencia ontológica analizada en términos de identidad (D^{id}). En particular, las formulaciones segunda y tercera de dicho análisis ($D^{\text{id-3}}$ y $D^{\text{id-3}}$) parecen equivaler a una relación interna asimétrica (ver ec. 14 y 15). Así, por ejemplo, a partir de la ec. (15) y de

$$R^{\text{int, sym}} x_1 x_2 \equiv \Box_{x_1 x_2} R x_1 x_2 \equiv \Box_{x_1} R x_1 x_2 \wedge \Box_{x_2} R x_2 x_1 \quad (25)$$

es posible establecer que una relación interna simétrica (como la que instancia la relación de entrelazamiento) equivale a dos relaciones de dependencia ontológica asimétricas recíprocas. A saber

$$R^{\text{int, sym}} x_1 x_2 \equiv D^{\text{id-3}} x_1 x_2 \wedge D^{\text{id-3}} x_2 x_1 \quad (26)$$

Esto simplemente significa que si x_1 y x_2 están interna y simétricamente relacionados, entonces sus identidades son recíprocamente dependientes. Esto sugiere que esta tercera formulación del análisis de la depen-

dencia basado en la identidad es de uso preferible en un marco metafísico coherentista. Es claro que de la ec. (26) se sigue la ec. (24), expresión que se pretendía probar como válida. Por tanto, se concluye que el coherentismo también se beneficia de considerar al entrelazamiento como una relación interna. Resulta interesante considerar que, una vez que se acepta la internalidad de la relación de entrelazamiento, tanto el estructuralismo como el monismo y el coherentismo pueden obtener cierto respaldo.

Consideraciones finales

La naturaleza metafísica del entrelazamiento, aunque plantea desafíos para los marcos metafísicos particularistas, ha demostrado adaptabilidad con respecto a diversos marcos metafísicos que se discuten actualmente en el área de la metafísica de la ciencia. Se ha sostenido que es preferible caracterizar el entrelazamiento como una relación interna, en el sentido de una relación esencial, ya que de este modo quedan mejor justificadas las proposiciones modales que típicamente se asocian al fenómeno del entrelazamiento cuántico. Además, considerar al entrelazamiento como una relación interna, en el sentido defendido en este artículo, permite brindar apoyo parcial tanto al estructuralismo como al monismo y al coherentismo. Adaptándose a estos distintos marcos metafísicos, el entrelazamiento puede considerarse como fundamental, derivado o incluso como una relación de dependencia simétrica.

El coherentismo es quizás el marco metafísico que puede combinarse con el entrelazamiento de una manera más parsimoniosa. No obstante, el coherentismo puede hacerse compatible con el monismo de prioridad si uno está dispuesto a respaldar los supuestos adicionales requeridos por este marco. Incluso puede valer la pena explorar la posibilidad de tomar el coherentismo como una forma de estructuralismo moderado, en el que estructura y objetos relacionados están en paridad ontológica. De esta manera, como señalan Calosi y Morganti (2021), el coherentismo podría estar en condiciones de reunir lo mejor de ambos mundos.

Bibliografía

- Armstrong, D. M. (1978). *A theory of universals (Universals & scientific realism: volume II)*. Cambridge University Press.
- Aspect, A., Grangier, P. & Roger, G. (1982). Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities. *Physical Review Letters*, 49(2), 91-94. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>

- Bell, J. S. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, 1, 195-200. <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- Bigaj, T. (2012). Entanglement of N distinguishable particles. *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric*, 27(40), 25-35.
- Calosi, C. (2014). Quantum mechanics and priority monism. *Synthese*, 191(5), 915-928. <https://doi.org/10.1007/s11229-013-0300-6>
- Calosi, C. (2020). Priority monism, dependence and fundamentality. *Philosophical Studies*, 177, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11098-018-1177-5>
- Calosi, C., & Morganti, M. (2021). Interpreting quantum entanglement: Steps towards coherentist quantum mechanics. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 72(3), 865-891. <https://doi.org/10.1093/bjps/axy064>
- Cleland, C. E. (1984). Space: An abstract system of non-supervenient relations. *Philosophical Studies*, 46, 19-40. <https://doi.org/10.1007/BF00353489>
- Cinti, E., Corti, A., & Sanchioni, M. (2022). On entanglement as a relation. *European Journal for Philosophy of Science*, 12(1), 1-29. <https://doi.org/10.1007/s13194-021-00439-5>
- Darby, G. (2012). Relational holism and Humean supervenience. *British Journal for the Philosophy of Science*, 63(4), 773-788. <https://doi.org/10.1093/bjps/axr049>
- Earman, J. (2015). Some puzzles and unresolved issues about quantum entanglement. *Erkenntnis*, 80, 303-337. <https://doi.org/10.1007/s10670-014-9627-8>
- Esfeld, M. (2004). Quantum entanglement and a metaphysics of relations. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35, 601-617. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2004.04.008>
- Fine, K. (1994). Essence and modality. *Philosophical Perspectives, Logic and Language*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.2307/2214160>
- Fine, K. (1995a). Ontological dependence. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 95, 269-290. <https://doi.org/10.1093/aristotelian/95.1.269>
- Fine, K. (1995b). The logic of essence. *Journal of Philosophical Logic*, 24(3), 241-273. <https://doi.org/10.1007/BF01344203>
- French, S. (2006). Structure as a weapon of the realist. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 106(1), 169-187. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9264.2006.00143.x>
- French, S. (2010). The interdependence of structure, objects, and dependence. *Synthese*, 175, 89-109. <https://doi.org/10.1007/s11229-010-9734-2>
- French, S., & Krause, D. (2006). *Identity in physics: A formal, historical and philosophical approach*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1017/9780521876223>

- org/10.1093/0199278245.001.0001
- Ghirardi, G., Marinatto, L., & Weber, T. (2002). Entanglement and properties of composite quantum systems: A conceptual and mathematical analysis. *Journal of Statistical Physics*, 108, 49-122. <https://doi.org/10.1023/A:1015439502289>
- Healey, R. A. (1991). Holism and nonseparability. *Journal of Philosophy*, 88, 393-421. <https://doi.org/10.2307/2026702>
- Howard, D. (1989). Holism, separability, and the metaphysical implications of the Bell experiments. En J. T. Cushing & E. McMullin (Eds.), *Philosophical consequences of quantum theory* (pp. 224-253). University of Notre Dame Press,
- Ismael, J., & Schaffer, J. (2020). Quantum holism: Nonseparability as common ground. *Synthese*, 197, 4131-4160. <https://doi.org/10.1007/s11229-016-1201-2>
- Jakslund, R. (2021). Entanglement as the world-making relation: Distance from entanglement. *Synthese*, 198, 9661-9693. <https://doi.org/10.1007/s11229-020-02671-7>
- Ladyman, J., Ross, D., Spurrett, D., & Collier, J. (2007). *Every thing must go: Metaphysics naturalized*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199276196.001.0001>
- Lewis, D. (1986). *Philosophical papers*. Volume II. Oxford University Press. <https://doi.org/10.2307/2026651>
- Lowe, E. J. (1998). *The possibility of metaphysics*. Clarendon Press.
- MacBride, F. (2020). Relations. En E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/relations/>
- McKenzie, K. (2014). Priority and particle physics: Ontic structural realism as a fundamentality thesis. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 65(2), 353-380. <https://doi.org/10.1093/bjps/axt017>
- Moore, G. E. (1919). External and internal relations. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 20, 40-62. <https://doi.org/10.1093/aristotelian/20.1.40>
- Schaffer, J. (2009). On what grounds what. En D. Manley, D. J. Chalmers & R. Wasserman (Eds.), *Metametaphysics: New Essays on the foundations of ontology*. Oxford University Press, 347-383. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199546046.003.0012>
- 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*, 119, 341-376. <https://doi.org/10.1093/mind/fzq033>
- Tahko, T. E., & Lowe, E. J. (2020). Ontological dependence. En E. N. Zalta

- (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/entries/dependence-ontological/>
- Teller, P. (1986). Relational holism and quantum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, 37, 71-81. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bjps/37.1.71>

Recibido el 9 de septiembre de 2024; revisado el 15 de octubre de 2024; aceptado el 12 de marzo de 2025.