

Información y conocimiento en la mecánica cuántica relacional

Juan Vila

Universidad Nacional Tres de Febrero / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas
y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina
jvila@untref.edu.ar

Recibido: 19 de mayo de 2025 | Aprobado: 30 de mayo de 2025

DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.ef.360861>

Resumen: Desde su aparición, la interpretación relacional de la mecánica cuántica (RQM) ha dado lugar a innumerables discusiones filosóficas, en particular en torno a la peculiar concepción del conocimiento que emerge de ella. En este trabajo me propongo analizar el modo en que RQM articula esta concepción a través de la noción de “información”. Primero, analizaré el modo en que su creador, Carlo Rovelli, comprende el conocimiento científico. Luego ofreceré una reconstrucción del argumento a favor de RQM y analizaré críticamente el modo en que la teoría articula ambos conceptos para brindar una imagen realista, naturalista y relacional del conocimiento científico. Dicho análisis revelará que, en su estado actual, RQM es incapaz de brindar una imagen coherente y el reciente intento por parte de sus defensores para subsanar este problema revela serias dificultades en el corazón de RQM, que demandan cambios profundos en la elaboración filosófica de la teoría.

Palabras clave: Rovelli, realismo, objetividad, relación, relativismo, sistema

Cómo citar este artículo

Vila, J. (2026). Información y conocimiento en la mecánica cuántica relacional. *Estudios de Filosofía*, 73, 251-278. <https://doi.org/10.17533/udea.ef.360861>



Information and knowledge in relational quantum mechanics

Abstract: The relational interpretation of quantum mechanics (RQM) has generated intense philosophical debate, particularly regarding its distinctive conception of knowledge. This paper examines how RQM articulates that conception through the notion of “information.” I begin by analyzing Carlo Rovelli’s view of scientific knowledge, followed by a reconstruction of the main argument supporting RQM. I then critically assess how the theory connects information and knowledge to present a realist, naturalist, and relational account of science. I argue that, in its current form, RQM fails to offer a coherent epistemological framework. Moreover, recent attempts by its advocates to resolve these issues reveal deep philosophical tensions at the heart of the interpretation, underscoring the need for substantial theoretical revisions.

Keywords: Rovelli, Realism, Objectivity, Relation, Relativism, System

Juan Vila: Investigador postdoctoral especializado en filosofía de la ciencia, naturalismo contemporáneo, fenomenología, metafísica y estética. Es autor del libro *La paradoja de la racionalidad* (Teseo Press, 2015), donde se centra en el concepto de “segunda naturaleza” de John McDowell y su relación con la filosofía de la mente y la metafísica contemporáneas. Es profesor en la Universidad Nacional de Argentina y ha impartido seminarios y conferencias en diferentes universidades (Argentina, Chile, Perú, Nueva Zelanda, Uruguay). Ha sido galardonado con el premio “Ted Kisiel Junior Scholar Award 2023” en la ciudad de Nueva York por el Círculo Heidegger de Norteamérica y la Asociación Filosófica Americana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5069-0893>



1. Introducción

Desde la publicación de su artículo seminal (Rovelli, 1996a), la Mecánica Cuántica Relacional (RQM) ha permanecido en el centro de los debates entre físicos y filósofos abocados a los fundamentos de la física cuántica. En lo que sigue, intentaré abordar las implicancias filosóficas de RQM mediante un análisis de la compleja relación que existe entre los conceptos de “información” y “conocimiento” en la teoría. Como veremos, ambos conceptos ocupan un rol central no sólo en el argumento original a favor de la interpretación relacional, sino también en el contexto más amplio de la discusión metafísica en la que Rovelli elabora y enriquece ambos conceptos, con la finalidad de brindar plausibilidad a RQM y defenderla de sus principales críticos.

Es fácil ver que, en la mayoría de los abordajes de RQM, las cuestiones técnicas han prevalecido por sobre los planteos estrictamente filosóficos. Pero es justamente la radicalidad *filosófica* de RQM la que constituye su mayor novedad, al igual que el mayor obstáculo para su aceptación. Como sostiene Candiotti: “la concepción del mundo propuesta por RQM nos invita a pensar la realidad [...] como un conjunto de procesos que manifiestan las ‘cosas’ como el resultado de su entrelazamiento”, y esto “requiere de una metafísica capaz de explicar cómo es posible concebir estructuras previas a objetos, sin contradicciones” (Candiotti, 2017, p. 8).

Como veremos en seguida, RQM defiende un enfoque cuyo concepto articulador –la información– lleva a pensar la mecánica cuántica como una teoría acerca de relaciones informacionales que constituyen sistemas físicos. Esto conduce inmediatamente a un conjunto de preguntas acerca del estatuto que esta “información” tiene dentro de una ontología naturalista como la que quiere defender Rovelli: ¿Es RQM una teoría realista o idealista? ¿Qué concepto de “información” propone? ¿Qué concepción del conocimiento científico de allí se desprende?

En lo que sigue intentaré responder a estos interrogantes. Procederé como sigue: en la próxima sección caracterizaré a rasgos generales la concepción filosófica del conocimiento científico defendida por Rovelli. Luego, ofreceré una reconstrucción del argumento principal a favor de RQM, para luego analizar en detalle el concepto central de “información”. Finalmente abordaré críticamente el modo en que RQM articula las nociones de “información” y “conocimiento” con base en la siguiente pregunta: *¿puede RQM brindar una imagen a la vez realista, naturalista y relacional del conocimiento científico?*

Como veremos, RQM busca mantenerse equidistante entre la Escila del *realismo* (que en su forma tradicional entiende el conocimiento como el descubrimiento de propiedades preexistentes en sistemas físicos igualmente preexistentes) y la Caribdis del *instrumentalismo* (que impone límites infranqueables a toda pretensión de conocimiento de la realidad cuántica a partir de nuestra relación cognitiva con ella);

y lo hace sosteniendo, por un lado, una tesis fuertemente relacional (que prohíbe toda determinación intrínseca de estados), y por otro lado, una equivalencia entre todos los sistemas (eliminando todo privilegio en la idea de un “observador”, que queda naturalizado en términos informacionales). Sin embargo, la conjunción entre ambas posiciones genera una tensión que ha sido señalada por muchos críticos y que los defensores de RQM buscan desactivar mediante la introducción de un nuevo postulado ([Adlam y Rovelli, 2023](#)). El análisis de dicho postulado revelará que RQM no logra brindar una imagen satisfactoria del conocimiento objetivo y que por lo tanto RQM requiere profundos ajustes en su ontología de base.

2. Descripción, explicación y comprensión

Los diferentes escritos de Rovelli dejan entrever una particular concepción del conocimiento científico y su relación con el pensamiento filosófico, la cual ha sido ampliamente discutida en la literatura reciente ([Candiotto, 2017](#); [Bitbol, 2024](#); [Riedel, 2024](#); [Adlam, 2025](#)). Podemos decir que, en términos generales, dicha concepción parte de dos compromisos meta-teóricos fundamentales.

El primero es el naturalismo. Tomo este término en el sentido de Aikin ([2006](#)), esto es, como dos tesis interrelacionadas: una metafísica y otra metodológica. La tesis metafísica puede formularse como una proposición condicional: si una entidad es considerada *real*, entonces debe existir en la naturaleza, o ser adecuadamente enmarcada dentro de una ontología general ofrecida por la ciencia natural ([Rovelli, 2016](#); [Di Biagio & Rovelli, 2022](#)). La tesis metodológica afirma que la ciencia –y en especial la *física*– constituye el marco teórico privilegiado desde el cual una filosofía respetable debe ser construida, de modo que las teorías científicas tienen la última palabra cuando se trata de decidir qué compromisos ontológicos deben ser aceptados y cuáles rechazados: “dejar que los descubrimientos de nuestras teorías físicas fundamentales informen nuestra orientación filosófica” ([Rovelli, 2018a](#), p. 8). Como veremos, el naturalismo tiene una relevancia directa en el modo en que Rovelli distingue su propia estrategia de otras interpretaciones de la mecánica cuántica.

El segundo compromiso constituye una apreciación global del conocimiento científico. En sus palabras: “el objetivo explícito de la investigación científica no es realizar predicciones cuantitativamente correctas; es comprender cómo funciona el mundo [...] esto significa construir y desarrollar una imagen comprehensiva del mundo” ([Rovelli, 2007](#), p. 230). Aunque una teoría científica puntual pueda ser útil para explicar un fenómeno específico, la ciencia es más que “un *corpus* acumulado de información empírica” ([Rovelli, 2018b](#), p. 486): debe proveer una *comprensión* del mundo. Este compromiso impone límites sobre lo que puede o no ser una interpretación satisfactoria del formalismo cuántico, ya que no se trata de “agregar

una interpretación razonable al formalismo”, sino más bien de “derivar el formalismo a partir de un conjunto de postulados motivados experimentalmente” (Rovelli, 1996a, p. 2). De esta manera Rovelli busca garantizar no sólo la coherencia lógica de los postulados con el formalismo, sino su armonización con el resto de nuestra experiencia del mundo. Al “derivar” la teoría a partir de principios (motivados ellos mismos por los resultados de la teoría) Rovelli rescata –en una “versión moderada” (Rovelli, 1996a, p. 2)– el modelo nomológico-deductivo de la explicación científica.

Aunque la mecánica cuántica constituye un formalismo exitoso, no existe hoy una interpretación definitiva de sus términos, ni mucho menos se la ha podido articular con una visión coherente (y compartida) del mundo. Para Rovelli, esto significa que QM no es *stricto sensu* una teoría científica acabada; para lograr esto deben ensamblarse los tres planos: primero, un *formalismo matemático* que exhibe ciertas características estructurales; segundo, una *teoría física*, entendida aquí como un conjunto de interpretaciones físicas asignadas a los principales términos y estructuras del formalismo matemático; y tercero, un *marco conceptual general*, ampliamente entendido como una “orientación filosófica” (Rovelli, 2016b) sobre la estructura última de la realidad.

Para comprender la relación entre estos tres elementos, puede ser útil hacer una distinción entre tres procedimientos diferentes (aunque íntimamente relacionados): (i) la descripción, (ii) la explicación y (iii) la comprensión. En física, un formalismo matemático exitoso es capaz de *describir* (predictivamente) el comportamiento de un conjunto específico de fenómenos. Para proveer una *explicación* de dichos fenómenos, sin embargo, se requiere una interpretación (en este caso, una interpretación *física*) del formalismo matemático. Un ejemplo de este nivel es la Relatividad Especial, que provee una interpretación física de las (ya conocidas) ecuaciones de Lorentz (Rovelli, 1996a, p. 2). Pero para proporcionar una *comprensión* del mundo, es necesario integrar los términos de la teoría a una “imagen comprehensiva del mundo” que trascienda el lenguaje de una comunidad científica específica. Por eso, dicha imagen no debe entenderse en términos exclusivamente científicos o teóricos (como una “Teoría del Todo”), sino como un conjunto de principios generales acerca de la realidad, a partir de los cuales los datos empíricos y las descripciones formales ya disponibles son *re-derivados* como “casos” de estos principios, tal que, si los principios son verdaderos, se sigue lo que vemos y calculamos. La “visión del mundo” resultante no es ni “puramente científica” (no se corresponde con los compromisos ontológicos de una teoría específica) ni “precientífica” (como si se tratase de una distinción sellarsiana entre “imagen manifiesta” e “imagen científica” del mundo); más bien, se trata de una concepción global del mundo *orientado* por nuestras mejores teorías científicas, en donde, como vimos, éstas tienen una prioridad epistemológica sobre aquella. De allí que la pretendida cosmovisión sea sugerida siempre dentro del marco interpretativo del naturalismo.

Análogamente, Rovelli señala tres caminos por los cuales RQM puede continuar desarrollándose: el primero es la investigación empírica (por ejemplo: nuevos resultados experimentales que pueden motivar una interpretación relacional); el segundo es el “desarrollo teórico” (por ejemplo: RQM puede ser más apropiada que otras teorías rivales para comprender el fenómeno de la gravitación cuántica); y el tercero es la elucidación filosófica, en donde “el progreso de la física fundamental” se enlaza con “algunas problemáticas filosóficas importantes, como la cuestión del realismo, la naturaleza de las entidades y las relaciones y el problema del idealismo” (2016b, p. 8). Este camino apunta a la construcción de “una imagen comprehensiva del mundo” que constituye uno de los propósitos elementales de la ciencia tal como la entiende Rovelli. Es esta tercera vía la que me interesa tomar en lo que sigue. Para ello será necesario primero presentar el argumento original de RQM, a la vista de los compromisos arriba mencionados.

3. El argumento a favor de RQM

El argumento original de Rovelli a favor de RQM toma como punto de partida el “problema de la medición”, es decir, la dualidad, al interior de la teoría cuántica, de una evolución unitaria y determinista descripta por la ecuación de Schrödinger y una evolución discontinua e irreversible expresada en el Postulado de Proyección (Di Biagio & Rovelli, 2021; Dorato, 2016). Para ilustrar esto, Rovelli emplea una versión del experimento mental conocido como “el amigo de Wigner”, a partir del cual elabora una “observación principal” (Rovelli, 1996a), que aquí llamaremos, por razones que se harán evidentes más adelante, “Tesis de la Relatividad” (TR):

(TR) En la mecánica cuántica, diferentes observadores pueden dar diferentes descripciones de la misma secuencia de eventos.

El experimento mental va como sigue: supongamos dos sistemas ‘O’ y ‘S’. De acuerdo con el formalismo estándar, antes de medir S, el sistema-observador O tiene a su disposición una superposición de posibles valores (estados) para una variable específica q , que se expresa en un estado normalizado:

$$|\psi\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle \quad (1)$$

Donde α y β son números complejos y $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. O puede medir cualquiera de estos dos valores 1 y 2 – con sus respectivas probabilidades $|\alpha|^2$ y $|\beta|^2$. Como es sabido, cuando O *mide efectivamente S*, la evolución unitaria se “quiebra” y O obtiene un valor específico, digamos 1. Podemos representar la sucesión temporal entre t_1 (antes de la interacción entre los sistemas O y S) donde se da una superposición cuántica, y t_2 en donde O obtiene un valor específico para la variable q :

$$\begin{aligned} O(t_1) \rightarrow S &= \alpha|1\rangle + \beta|2\rangle & (i) \\ O(t_2) \rightarrow S &= |1\rangle & (ii) \end{aligned}$$

Ahora consideremos a otro observador ‘W’ externo a la situación experimental. Para W, lo que hay es un sistema compuesto [S+O] aislado del ambiente, sobre el cual W no realiza ninguna medición directa durante el intervalo $[t_1, t_2]$. W conoce el estado inicial de O, que es descripto como $|init\rangle$. De acuerdo con la mecánica cuántica estándar, W obtiene una descripción diferente de la misma secuencia de eventos en t_1 y t_2 :

$$\begin{aligned} W(t_1) \rightarrow [S + O] &= (\alpha|1\rangle + \beta|2\rangle) \otimes |init\rangle & (I) \\ W(t_2) \rightarrow [S + O] &= \alpha|1\rangle \otimes |01\rangle + \beta|2\rangle \otimes |02\rangle & (II) \end{aligned}$$

En la descripción de W, $|init\rangle$ evoluciona hacia un estado en t_2 en donde no ha habido ningún “colapso”, y por lo tanto debe reconocerse que el formalismo admite dos descripciones diferentes –y simultáneas– de una situación física: una, en la que un sistema cuántico consistente en una superposición de estados (recuérdese que toda superposición normalizada de estados cuánticos es un estado cuántico, por la linealidad del espacio de Hilbert) evoluciona uniformemente; la otra, en donde tiene lugar la medición de un estado físico concreto.

El punto central de Rovelli es que la pregunta “¿qué es lo que *realmente* ocurre?” carece de sentido. Si decimos que W está en lo correcto y O está equivocado, entonces *toda* medición hecha en física cuántica contradice el formalismo. Si, a la inversa, afirmamos que W está equivocado y O en lo correcto, esto conllevaría a admitir que W no debe aplicar el formalismo cuántico al sistema [S+O]. Sin embargo, sus predicciones son aplicadas en sistemas como [S+O] (Rovelli, 1996a, p. 5). La conclusión parece inevitable: del formalismo cuántico estándar se sigue TR. En todo caso, la tarea es darle sentido a esta aparente paradoja. Hay varias estrategias para intentar responder a esta dificultad.

Una posible salida consistiría en explicar la dualidad descriptiva en términos de una dualidad entre sistemas macroscópicos y microscópicos, tal como sucede con el principio de complementariedad de Bohr. Pero esta estrategia requiere “separar la realidad en dos tipos de sistemas: por un lado, sistemas cuánticos, y por el otro, una clase especial de sistemas” (Rovelli, 1996a, p. 4), lo cual para Rovelli, no está en absoluto motivado por la teoría. En su espíritu naturalista, sugiere que “más razonable mantenerse comprometido, mientras no haya una refutación plausible, a la regla según la cual todos los sistemas físicos son equivalentes respecto a la mecánica” (Rovelli, 1996a, p. 4). Esto se expresa en la “primera hipótesis” formulada por Rovelli, que llamaré “Tesis de Equivalencia” (TE):

(TE) Todos los sistemas físicos son equivalentes. No hay distinción entre sistemas “clásicos” y “cuánticos”.

Otra estrategia posible consistiría en postular variables ocultas aún no descubiertas por la teoría. Una hipótesis de variables ocultas –como la posición guiada por el potencial cuántico ‘R’ de De Broglie-Bohm– supone la incompletitud de la mecánica cuántica y consecuentemente la necesidad de modificar o ampliar su estructura. Nuevamente, desde la perspectiva naturalista de Rovelli, declarar la incompletitud de la teoría parece más un sesgo filosófico que una necesidad interna. En efecto, ¿por qué suponer que QM es una teoría incompleta, por el sólo hecho de que no coincide con los modelos descriptivos de la mecánica clásica, o más aún, con nuestras intuiciones acerca de “lo real”? Mas bien, su incomparable éxito “sugiere que la estructura del mundo descripta por la mecánica cuántica es más profunda, y no más superficial, que el esquema descriptivo de la mecánica clásica” (Rovelli, 1996a, p. 7).¹ Esta idea se expresa en una “segunda hipótesis”, que llamaré “Tesis de Completitud” (TC):

(TC) La mecánica cuántica es una descripción completa del mundo físico.

El argumento de Rovelli para apoyar TE y TC consiste en mostrar que los enfoques contrarios a estos postulados (que postulan “sistemas especiales” o “variables ocultas”) no están motivados por la estructura de la propia teoría cuántica, sino por una posición metafísica previamente asumida que refleja una injustificada preferencia de los parámetros clásicos. Según estas posiciones, “una teoría en la cual la descripción de la realidad es dependiente del observador” no puede ser completa, porque si no, “nuestro concepto de la realidad se vería disturbado” (Rovelli, 1996a, p. 7).

Este “concepto de realidad” es identificado directamente con una forma clásica de realismo: la idea de una realidad independiente de todo observador. A favor de adoptar una actitud más permeable con la teoría, Rovelli recuerda “la gran resistencia que las nociones relacionales de ‘reposo’ y ‘movimiento’ encontraron a comienzos de la revolución científica” (Rovelli, 1996a, p. 7). Del mismo modo, la mecánica cuántica “bien podría estar generando una –aún no desarrollada– revisión de cosmovisiones tan radical como aquella que tuvo lugar en el Siglo XVII” (Rovelli, 1996a, p. 7).

De TR y TC se sigue la afirmación central del argumento a favor de la interpretación relacional de la mecánica cuántica, que aquí llamaré “Tesis de la Relacionalidad” o TREL:

1 Este es un tema ampliamente debatido, en especial a raíz del llamado “problema de la base privilegiada”: si el formalismo de la mecánica cuántica permite describir el mismo sistema físico en diferentes bases matemáticamente equivalentes, ¿por qué privilegiar la que se corresponde con valores propios de un resultado experimental determinado? Como cada observable corresponde a una base ortonormal en el espacio de Hilbert empleado para representar un sistema físico, y dado que todas las bases son igualmente válidas para la descripción del estado del sistema, pareciera que la elección de una base es “matemáticamente *ad hoc*” ya que no está motivada por la teoría (Barrett, 2005, p. 7). Este problema, inherente al formalismo estándar, afecta a todas las interpretaciones que toman el formalismo estándar como punto de partida. Agradezco a un revisor anónimo por señalar este punto.

(TREL) La mecánica cuántica es una teoría acerca la descripción física de sistemas físicos relativa a otros sistemas, y es una teoría completa del mundo.

Formulada negativamente, TREL sostiene que *no hay estados físicos independientes de todo observador*, y por lo tanto una interpretación de la realidad física en términos del realismo clásico queda por principio descartada. El fenómeno de la contextualidad de los estados cuánticos es interpretado en RQM como “el descubrimiento de que los hechos acerca de un sistema siempre son definidos en relación a otro sistema, con el cual aquél interactúa” (Di Biagio & Rovelli, 2021, p. 7). Los estados no son hechos pre-existentes “descubiertos” por un observador, sino que *son* relativos a este observador específico; por lo tanto RQM prohíbe toda “visión desde fuera del mundo” en la que los estados físicos “se dan” con total independencia de la “observación” (Rovelli, 2016b). La realidad física es intrínsecamente relacional porque cualquier sistema físico sólo “existe” (esto es, está en un estado físico concreto) *en relación con* otro sistema con el cual está interactuando. De este modo, la “observación” se convierte en la *relación fundamental* postulada por RQM ya que todo sistema físico existe en un estado relativo a tal o cual otro sistema “observador”.

La primera consecuencia importante de esto es una relectura del problema de la medición en la cual ya no hay ningún “colapso” de la función de onda. De acuerdo con la hipótesis del colapso, existe una relación *causal* entre la observación y el estado cuántico, de modo que “al medir un electrón, éste ‘salta’ repentinamente de una superposición a un estado puro” (Wood, 2010, p. 7). Pero si, de acuerdo con TE, no hay nada especial en una “observación” o “medición”, entonces RQM requiere una interpretación del “colapso” que evite toda distinción entre “observador” y “observado”, o entre sistemas macroscópicos y microscópicos (Rovelli, 1996a, p. 10). Lo que Rovelli (1996a) necesita, por tanto, es una “interpretación física comprehensiva” (p. 9) de la relación de “ser relativo a” que pueda no sólo evitar cualquier lectura subjetivista, sino que proporcione una *explicación* de la contextualidad cuántica, cuya *descripción* ya es proporcionada por la estructura matemática de la teoría, esto es, su álgebra no-conmutativa (Rovelli, 2018a, 2021). Es aquí donde Rovelli introduce el Postulado Informacional (PI):

(PI) La mecánica cuántica es sobre la *información* que un sistema físico tiene sobre otro sistema.

Como es sabido, Rovelli emplea el concepto estadístico de “información” de la teoría de la comunicación de Shannon, con el fin de garantizar una noción “puramente física”, i.e., libre de nociones semánticas. En la teoría de Shannon, la “información” es simplemente una medida estadística del número de estados posibles en los que

puede encontrarse un sistema cuyos estados están físicamente restringidos. Al darse ciertas condiciones en una fuente –pudiéndose haber dado otras– ésta puede ser considerada generadora de “información”. Cuando la realización de estas condiciones restringe –a través de un canal físico– los posibles estados de otro sistema, entonces decimos que éste “tiene información” acerca de aquél (Lombardi, 2004; Dretske, 1981, 1983; Shannon & Weaver, 1949).

Esta restricción implica que ambos sistemas físicos están *correlacionados*. Un termómetro T tiene información sobre un sistema C (la temperatura) dada la correlación entre el estado de C y el de T. Al no contener elementos semánticos o epistémicos, esta noción cuenta con la ventaja de evitar la ilegítima separación entre “tipos” de sistemas que está a la base de la hipótesis del colapso. Ser “observador” significa “tener información” sobre otro sistema; y de acuerdo con RQM, todo sistema puede ser considerado observador de *algún* otro sistema, ya que de acuerdo con TREL, *siempre* se da *alguna* correlación. Esta “democratización” de la relación de observación constituye “el corazón” de RQM (Rovelli, 2021, p. 106).²

Decir que RQM es una teoría de la información permite inscribirla dentro del conjunto de las llamadas “interpretaciones informacionales” (Van Fraassen, 2010). Pero a diferencia de éstas –que combinan elementos “objetivos” y “subjetivos” como la representación y manipulación de los sistemas físicos (Fuchs, 1962; Bub, 2005) – en RQM la propiedad de “ser observador” es física y no epistémica (TE), y dichas relaciones no están referidas a “sistemas físicos” subyacentes (TC). En RQM, el mundo físico es *intrínsecamente* relacional. Por esta razón “el mantra ‘la información es física’ ofrece una nueva perspectiva en la dicotomía tradicional entre lecturas ‘epistémicas’ y ‘ónticas’ del estado cuántico” (Adlam & Rovelli, 2022, p.11).

De modo que el concepto de “información” es un hilo conductor que le permite a Rovelli articular los diferentes planos de una teoría científica mencionados al comienzo: PI es el elemento *explicativo*, la interpretación física del elemento *descriptivo* de la teoría, que es la estructura matemática de la teoría cuántica, caracterizada por la no-conmutatividad de su álgebra. Sin embargo, el plano de la *comprensión* demanda trascender los estrechos límites de la teoría física para indagar en “problemáticas filosóficas importantes” más amplias. Esta necesidad aparece condensada en un denso pasaje de *Helgoland*:

Una visión del mundo [...] para ser coherente, debe poder justificar y dar cuenta de las formas en que los habitantes de ese mundo llegan a esa visión, a

2 En esta interpretación, la función de onda es solo una herramienta que asigna probabilidades a estados relativos. El aparente colapso surge, como señala Wood (2010, p. 11), porque la ecuación de Schrödinger excluye al observador, impidiendo describir su interacción con el sistema. El teorema de Breuer confirma que esto es inevitable: un sistema no puede describirse por completo a sí mismo (Adlam, 2025; Dorato, 2016; Rovelli, 2016a; Van Fraassen, 2010). Si se incluye a O en el sistema, la evolución unitaria persiste, pero ahora la descripción de [O + S] proviene de un tercer sistema no interactuante, lo que —como veremos— plantea dificultades internas para RQM.

esa lectura. Esta condición, que se considera a menudo como la dificultad del materialismo ingenuo, se satisface inmediatamente si repensamos la materia como interacciones y correlaciones. Mi conocimiento del mundo es un ejemplo del resultado de interacciones que generan informaciones significativas (Rovelli, 2021, pp. 149-150).

Si alguna forma de naturalismo puede ser filosóficamente defendible, entonces debe poder dar cuenta del *conocimiento* que los agentes epistémicos tienen de ese mundo natural. Rovelli es consciente de la dificultad que han tenido las formas tradicionales de naturalismo para satisfacer esta condición, dada su adhesión a alguna forma de fisicalismo cuya imagen de la naturaleza parece hacer ininteligible fenómenos como la intencionalidad, la significatividad o la normatividad. Esta dificultad impide toda tentativa de brindar una “imagen comprehensiva” del mundo, al generar lo que Rouse (2002) denominó “dualismo naturaleza-normatividad”, donde “el ‘mundo natural’ comprendido científicamente y la normatividad de los pensamientos, aserciones y acciones en la cual tal comprensión tendría lugar, han sido preconcebidos de tal manera que se previene su reconciliación” (pp. 11-12).

Rovelli confía en que la información puede ofrecer una explicación fisicalista del significado, dando un primer paso en dirección a la superación del “dualismo naturaleza-normatividad”, ofreciendo una explicación naturalista de la aparente “relevancia” que tiene la observación humana en los resultados experimentales de los fenómenos cuánticos. Sin embargo, como señalan Muciño, Okon y Sudarski (2015), “hace falta desarrollar filosóficamente estas ideas; simplemente sugerirlas sería débil e ineffectivo” (p. 18). Se requiere analizar si la idea de información puede efectivamente brindar una *comprensión* del mundo físico que incluya –al menos en principio– fenómenos normativos. ¿Puede el concepto de información satisfacer la condición expresada por Rovelli en este pasaje?

4. Variedades de la “información”

Aunque la “información” sea la relación física fundamental a la base de RQM, Rovelli reconoce que su empleo general es ambiguo, porque cubre “un amplio espectro de fenómenos que van desde los estados epistémicos de un observador consciente, hasta la simple cuantificación de alternativas, *a la Shannon*” (Rovelli, 2018a, p. 5). Pero dicha ambigüedad es también indicativa de “un rol transversal y unificador” (Rovelli, 2015, p. 3). Por ende, es razonable considerar la posibilidad de que un desarrollo ulterior de esta noción sea capaz de cerrar el viejo dualismo metafísico entre “el mundo puramente físico y el mundo del significado, los propósitos, la intencionalidad y el valor” (Rovelli, 2016a, p. 1). No obstante, para motivar dicha concepción es necesario ir más allá del concepto estadístico de “información” (Dorato, 2016; Rovelli, 2018a).

Aunque el concepto estadístico no pueda tomarse como “una noción primaria desde la cual todas las demás pueden ser derivadas”, puede igualmente funcionar como un “principio organizador” que permita articular diversas perspectivas científicas y filosóficas (Rovelli, 2018a, p. 5). Con esta estrategia en mente Rovelli describe, a lo largo de varios escritos, diferentes tipos de información de acuerdo con su campo de aplicación y su significado ontológico.

La *información física* puede definirse como el aspecto físico de las condiciones de la comunicación establecidas por Shannon entre la fuente y el receptor, el cual es definido enteramente mediante el concepto de “entropía”; esto es, el número de microestados compatibles con un macro-estado dado determina la entropía, al mismo tiempo que define la información, porque el rango de estados posibles del sistema está estadísticamente constreñido por el estado físico actual de la fuente. De modo que la entropía termodinámica es en sí misma una noción informacional, porque se define en los mismos términos que la información de Shannon, al punto que “el concepto de ‘cantidad media de información’ y el concepto de ‘entropía’ son mutuamente intercambiables” (López & Lombardi, 2015, p. 148). Para Rovelli, este hecho indica el carácter relacional del concepto de “información física”:

La información relevante en física es siempre la información relativa entre dos sistemas. No hay ningún elemento subjetivo en ella: está totalmente determinada por el estado y el operador hamiltoniano que dictan qué variables son las relevantes en la interacción (Rovelli, 2015, p. 1).

De modo que “la noción elemental de ‘información relativa’ es la estructura física en la cual están basadas otras nociones de información más complejas, que contienen valor semántico” (Rovelli, 2021, p. 149). Aunque esto no implique la posibilidad de una reducción de nociones semánticas a estadísticas, indudablemente la “información relativa” es básica en un sentido débil, como puede ser el de la supervenencia. Según esto, la información semántica superviene de la información relativa en un sentido muy específico: *ningún* tipo de información semántica es *absoluta*, ya que esto entraría en contradicción con los principios TE, TC y PI, que caracterizan la información relativa.

Esta es una de las razones por las cuales Rovelli apela a la decoherencia para explicar la emergencia de “estados estables” (Rovelli, 2019; Rovelli, 2021; Di Biagio & Rovelli, 2021). La “estabilidad clásica” de los sistemas macroscópicos está a su vez referida a un concepto de clásico de información, donde la obtención de valores definidos se interpreta como el descubrimiento de propiedades estables y preexistentes, lo cual no se da en los sistemas cuánticos (Brukner & Zeilinger, 2001). La decoherencia busca solucionar esta “dualidad” aduciendo que la estabilidad clásica es en verdad “ilusoria”, porque en estos casos “los patrones de interferencia se vuelven indetectables” a medida que nos alejamos de un contexto microscópico

en el cual es posible hablar de sistemas cuánticos relativamente aislados (Di Biagio & Rovelli, 2021, p. 5).

En consecuencia, la *información cuántica* es definida como todo tipo de información en donde se cumplen dos postulados (Rovelli, 2015; 2021). El primero establece que la cantidad máxima de información relevante sobre un sistema es finita (siendo el límite determinado por la constante de Planck); y el segundo establece que siempre es posible adquirir nueva información relevante sobre una sistema. Cuando esta nueva información es adquirida, alguna información relevante previamente obtenida necesariamente se pierde.³

La idea de “información relevante” está en la base de la noción de información cuántica. En física, la información relevante es aquella cuya adquisición permite la *predicción* del comportamiento futuro de un sistema físico (Rovelli, 2018a). Pero la relevancia no es únicamente un criterio metodológico: como la información relativa implica una correlación nomológica, la relevancia de cualquier información depende del modo en que la adquisición de esa información *afecta* al sistema “observador”. Esto se vuelve claro en el contexto biológico: de toda la información disponible en el entorno de una bacteria, sólo es relevante *para ella* aquella información cuya adquisición afecte la probabilidad futura de mantener su propia estructura –por ejemplo, información relativa a la ubicación del alimento. Rovelli (2021) confía en que dicha concepción habilita una comprensión naturalista del significado y la intencionalidad:

La noción de “información relevante” es física, pero también intencional en el sentido de Brentano. [...] Trae inevitablemente consigo una noción de “verdad” o “corrección”: en cada situación particular, el estado interno de la bacteria puede codificar el gradiente de glucosa correctamente, o no. Tiene, por tanto, muchos de los ingredientes que caracterizan al “significado” (p. 223).

La “información relevante” para un sistema biológico es *información significativa*. La información significativa es la información cuya interrupción puede acrecentar la entropía en un sistema vivo. Siguiendo la famosa definición de la vida ofrecida por Schrödinger (1967), un organismo vivo puede ser entendido como un sistema físico capaz de mantenerse lejos del equilibrio termodinámico. En otras palabras, los seres vivos son sistemas físicos que se encuentran en estados *altamente improbables*, gracias a la energía disponible en la superficie de la Tierra que éstos emplean (Rovelli, 2016a; 2021).

³ Existe un debate en torno a si es legítimo hablar de *dos* conceptos de información —clásica y cuántica— o si, en verdad, se trata de un concepto aplicado a dos sistemas diferentes (López & Lombardi, 2015). De todas formas, es evidente que, si el concepto semántico superviene al estadístico, por TC también debemos admitir que en última instancia, *toda* información física es cuántica.

Siguiendo a Dretske, Rovelli considera que la información significativa no sólo es ubicua en el mundo vivo, sino que permite explicar la filogenia y la ontogenia. Explica los procesos filogenéticos porque la evolución sólo es posible a partir de la existencia de una “estabilidad informacional” (garantizada por la transmisión de la *información genética*) que permite “la reproducción de estructuras y procesos a través de eones de tiempo” (Rovelli, 2021, p. 220). Pero además explica la ontogenia, porque el desarrollo y la estabilidad del organismo depende de su capacidad para interpretar, manipular y producir información del entorno. Por esta razón, el significado sólo es posible sobre la base de un proceso evolutivo que garantiza la reproducción de una cantidad de información física (Rovelli, 2016a).

La información biológica puede ser considerada *directamente significativa* –si su marginalización incrementa *directamente* la probabilidad de un incremento de la entropía en el sistema vivo– o *indirectamente significativa*, en caso contrario –por ejemplo, su obtención puede “empoderar” indirectamente el desarrollo de un sistema vivo en un ambiente dado (Rovelli, 2016a). Esta última noción parece apuntar a formas de significación más “complejas” presentes en la vida humana, dentro de un marco completamente naturalista.⁴

De modo que, en RQM están presentes (aunque no siempre distinguidas con claridad) diversas concepciones de la información, cada una más fundamental que la siguiente:

INFORMACIÓN RELATIVA	correlación física
INFORMACIÓN CUÁNTICA	incierta y no-conmutativa
INFORMACIÓN RELEVANTE	nomológica
INFORMACIÓN SIGNIFICATIVA	← directamente relevante → indirectamente relevante

Imagen 1
Clases de información en RQM

En tanto que todas las relaciones de significación son concebidas en última instancia como el producto de interacciones de información relativa, “la rígida distinción entre un mundo mental y un mundo físico desaparece” (Rovelli, 2021, p. 213). La información es un fenómeno universal y “la física cuántica es el descubrimiento de que el mundo físico es una red de correlaciones: información relativa”, de modo

4 Millikan (2006), por su parte, ha hecho hincapié en un punto similar al sugerir que la racionalidad humana se caracteriza por la posibilidad de referir a “hechos muertos”, i.e., transmitir información que no es *directamente* relevante para la supervivencia de un individuo, pero que sin embargo está fundada en funciones biológicas.

que “hay una continuidad entre el mundo de los significados de nuestra vida mental y el mundo físico” (Rovelli, 2021, p. 226). El descubrimiento fundamental de RQM es que la “sustancia” primaria del mundo físico es la información relativa.

Ciertamente, RQM requiere (al menos en principio) de una comprensión fisicalista del conocimiento si es que quiere dar un sustento filosófico al principio de la equivalencia de los sistemas físicos (PE). Con este fin, Rovelli acude a la teleosemántica –en especial en la formulación de Dretske, quien ha ejercido una influencia visible en sus textos más filosóficos. La teleosemántica designa a un grupo de posiciones de la filosofía de la mente que intentan disolver la distinción existente entre los fenómenos normativos y causales explotando la noción de *función* (ubicua en la biológica).⁵

Es posible afirmar que una inspección más meticulosa en la problemática de las teorías naturalistas de la intencionalidad revelaría dificultades a las cuales Rovelli aún no se ha enfrentado de manera frontal. No es menos cierto, a su vez, que la noción estadística de “información” es distinta a nuestra concepción coloquial del término, y para algunos, incluso, inadecuada para dar cuenta de fenómenos biológicos (Artmann, 2008). Pero todo lo que necesita Rovelli es que estas referencias sugieran la posibilidad de naturalizar los fenómenos mentales y semánticos, lo que está motivado por la concepción comprehensiva del conocimiento científico que, como vimos, yace a la base de su posición. Su referencia a formas rudimentarias de normatividad basadas en el equilibrio termodinámico de sistemas biológicos apunta precisamente a fortalecer esta idea. Aunque ciertamente, como admite Rovelli, el concepto de “información significativa” no constituye, por sí sola, una herramienta suficiente para disolver totalmente el hiato conceptual entre lo físico y lo mental, “sin embargo es el primer eslabón de la cadena –el eslabón más difícil” (Rovelli, 2021, p. 147).

No obstante, queda abierta la cuestión de si este concepto es realmente capaz de asumir el rol unificador que Rovelli pretende y promete, incluso al interior de RQM. ¿Puede realmente la noción de “información relativa” brindar una explicación satisfactoria del *conocimiento* físico a partir de los postulados de la teoría? ¿Puede, en suma, RQM brindar, a través de su ontología informacional, una imagen *realista, naturalista y relacional* del conocimiento científico? En la próxima sección intentaré responder a estas preguntas.

5. Información y conocimiento

A través de su interpretación relacional de la mecánica cuántica, Rovelli busca construir una imagen que sea a la vez *realista* (mediante una interpretación objetiva del principio de contextualidad), *naturalista* (al interpretar las ideas de “medición” u “observación”

⁵ Para un análisis crítico de la teleosemántica aplicada al problema “mente-mundo”, véase Vila (2015).

como una relación puramente física) y *relacional* (erradicando la idea de un estado físico independiente de todo observador). Dado este conjunto de compromisos iniciales, Rovelli entiende que la única forma de lograr esto es manteniendo su teoría en una delicada equidistancia entre dos extremos: la Escila del “realismo clásico” (en donde la realidad es concebida en términos absolutos, i.e., independientes de todo observador) y la Caribdis del “relativismo” (en donde “lo real” es “mediado” por una perspectiva subjetiva).

En efecto, la acusación de relativismo ha sido una de las críticas más frecuentemente dirigidas hacia RQM (Rovelli, 2016b). Según estos críticos, TREL paga un precio demasiado alto, porque sacrifica la idea de que la física habla de una realidad objetiva. Wood (2010), por ejemplo, se pregunta “cómo podría haber alguna descripción del mundo, si la propia existencia de los objetos es dependiente del observador –¿Qué están observando los observadores si éste es ontológicamente primario respecto al objeto?” (p. 14). Análogamente, de Ronde y Fernández Moujan (2018) afirman que RQM implica el relativismo porque “la definición de un sistema físico y sus propiedades (el objeto de estudio) es siempre relativo a un sujeto observador, un sistema o un aparato de medición (el sujeto que percibe)” (p. 18).

Es evidente que RQM reaviva el temor de un esquema idealista en donde la relación entre el sujeto y el mundo yace a la base de cualquier cosmovisión científica posible. Para sus críticos, la inexistencia de una perspectiva independiente del observador impide necesariamente una descripción objetiva de los fenómenos físicos –incluso si la idea de “observador” es tomada en sentido amplio. La conclusión obvia es que RQM no es una teoría sobre la realidad física sino una teoría acerca de la *información* que los sistemas físicos tienen unos de otros. Como RQM niega una realidad independiente del observador, no es posible reconstruir la mecánica cuántica dentro de un marco realista clásico, y por lo tanto la teoría abandona toda pretensión de objetividad. Esta concepción clásica de la “objetividad” física invocada aquí (y de la cual Rovelli toma distancia) fue paradigmáticamente expuesta en el famoso artículo de Einstein, Podolski y Rosen (1935):

Los elementos de la realidad física no pueden ser determinados por consideraciones filosóficas *a priori*, sino que deben encontrarse apelando a los resultados experimentales. No obstante, una definición comprehensiva de la realidad es innecesaria. Nos conformaremos con el siguiente criterio, que consideramos razonable. Si podemos predecir con certeza (esto es, con probabilidad igual a uno) el valor de una cantidad física *sin perturbación alguna en el sistema*, entonces existe un elemento *n* de realidad física correspondiente a esta cantidad (p. 777; mi énfasis).

Este “criterio razonable” expresa una posición filosófica que Rovelli identifica con el “realismo clásico”: la idea de que la única noción legítima de “realidad objetiva”

es aquella pasible de ser representada “sin perturbación alguna”, minimizando a un valor nulo *nuestra relación cognitiva* con esa realidad. Este ideal filosófico se expresa matemáticamente en el fenómeno de la invariancia: una estructura es invariante si permanece estructuralmente idéntica a través de un conjunto de transformaciones, o dicho de otro modo, las transformaciones invariantes son aquellas bajo las cuales una propiedad específica de un objeto o sistema se conserva. Aunque *toda* medición física implica algún grado de perturbación, la invariancia estructural garantiza la posibilidad de distinguir las invariantes –que representan matemáticamente el aspecto “objetivo” del sistema estudiado– de la “perspectiva” que adoptamos para describir el sistema. No caben dudas de que RQM desafía esta forma clásica de realismo: no sólo la granularidad de su ontología impide pensar las entidades físicas en términos de “permanencia”, sino que su perspectivismo hace ininteligible la idea de una “descripción” independiente de toda perspectiva (Rovelli, 2018a).

Pero para Rovelli (2018a), es posible preservar una posición realista más moderada –esto es, la idea de que existe un mundo físico independiente de nuestra mente– prescindiendo de esta noción fuerte de “objetividad”. Pero obviamente esto demanda una reformulación radical de la idea de “realidad objetiva” a la luz de esta ontología discreta, perspectivista y anti-monista. En el mundo de Rovelli, la idea clásica de una sustancia portadora de atributos estables es reemplazada por un mundo poblado por eventos informacionales instantáneos y discontinuos –“un enjambre de eventos cuánticos discretos” (Rovelli, 2018a, p. 7). Por lo tanto, todo lo que podemos hacer es “mirar atrás” para obtener datos acerca de la última interacción de un sistema físico, sin interpretar esto como la transmisión de información a través de un canal físico continuo (Rovelli & Adlam, 2022, p. 9).

Esto es una consecuencia directa de concebir la realidad física en términos relacionales. Si el ingrediente básico de la realidad son las interacciones, entonces toda relación que tengamos con un sistema físico será, de hecho, constitutiva de la realidad misma –y no un “agregado” subjetivo de una realidad previamente no correlacionada. Y como “conocer” es un tipo de relación, no debería sorprender que nuestro conocimiento de cualquier realidad sea “relativo” a nosotros mismos –un hecho que en la contemporaneidad se ha dado en llamar “correlacionismo” (Candiotto, 2017). Pero esta relatividad no puede ser considerada como algo “arbitrario” o “subjetivo”, ya que esto presupondría que las condiciones subjetivas del conocimiento no están ellas mismas correlacionadas con el mundo físico, y esto no es más que “un residuo del anti-naturalismo” en donde el conocimiento es inmune a los fenómenos cuánticos, porque está des-corporeizado (Di Biagio & Rovelli, 2022, p. 62). Es decir que el relativismo sólo funciona bajo la presuposición de la existencia de una realidad fundamental y no-correlacionada que no puede ser aprehendida en términos absolutos debido a que todo conocimiento de ella está inevitablemente referido a una perspectiva *subjetiva*. Y este claramente no

es el derrotero de RQM, en donde lo que hay es un universo donde la información física fluye con independencia de los observadores humanos, y en donde el “correlacionismo” –esto es, el dato fenomenológico básico según el cual hay una perspectiva humana a la base de cualquier relación práctica o epistémica con el mundo– es universalmente válido, no como un principio, sino como *una consecuencia directa* del enfoque relacional.

De modo que el único sentido en que esta lectura puede considerarse *realista* es mediante una contraposición con esta forma “subjetivista” de relativismo, que presupone un “corte epistémico” entre el observador y la realidad que Rovelli prohibió a través de TE. El “realismo” de RQM consiste en que ésta “no es acerca de agentes, creencias, observadores o experiencias” sino acerca de “hechos reales del mundo y las probabilidades relativas de su ocurrencia”. Para Rovelli, estos “hechos relativos” permiten “una interpretación relacional pero realista de la mecánica cuántica” por el simple hecho de que la relationalidad no está referida a agentes humanos (Di Biagio & Rovelli, 2021, p. 30). Nuevamente, la estrategia de Rovelli es mostrar que los críticos de RQM presuponen un concepto de “conocimiento” contrario a los compromisos naturalistas que él mismo defiende.

Cabe preguntarse, sin embargo, si esto es suficiente para mantener una posición realista. Aquí se revela una dificultad central en la ontología de RQM, que puede motivarse haciendo una simple pregunta: *¿cuál es la referencia de la teoría?* ¿Es RQM una teoría acerca de la “información” (Rovelli, 1996a), de “sistemas físicos” (Rovelli, 2015) o de “eventos cuánticos” (Di Biagio & Rovelli, 2022)? Una respuesta inmediata sería decir que RQM habla de todas estas cosas a la vez. La “idea básica” de RQM es que “el mundo puede descomponerse (de varias maneras alternativas) en sistemas físicos que interactúan entre sí” (Rovelli, 2016b, p. 1). Sólo cuando éstos sistemas interactúan (es decir, cuando intercambian información) sus variables físicas adquieren un valor determinado relativo a los sistemas interactuantes. Un evento cuántico es este hecho instantáneo y discontinuo: la correlación entre sistemas.

Sin embargo, esta respuesta no está exenta de problemas, ya que no queda claro que RQM pueda siquiera *definir* lo que es un sistema. La noción misma de “sistema físico” –así como el concepto de “estado físico”– usualmente requiere de una especificación de una serie de condiciones desde las cuales es posible hablar *del mismo sistema físico* desde una multiplicidad de perspectivas; de lo contrario, no sería siquiera posible hablar de *diferentes descripciones* (perspectivas) de un sistema. Pero pareciera que postular *algo* a lo cual hace referencia *una multiplicidad* de descripciones no es una posibilidad abierta por RQM, ya que no es posible establecer la existencia objetiva de un sistema físico que sea independiente de toda descripción (TREL). Esto plantea un desafío ontológico central para RQM: *¿puede preservarse la idea de una realidad física “allí afuera” al mismo tiempo que se propone una ontología de puras relaciones?*

Consciente de esto, Candiotti (2017) propone interpretar la ontología de RQM empleando el Realismo Óntico Estructural (OSR) en su versión clásica formulada por Ladyman y French. De acuerdo con OSR, las relaciones no son “conexiones entre objetos” sino “interacciones entre procesos” que conforman estructuras estables, que constituyen el verdadero referente de las teorías científicas (p. 8). Para Candiotti, OSR ofrece una ontología adecuada para RQM, ya que a la base de su descripción de la realidad cuántica no hay “sustancias” elementales, sino estructuras relacionales; y dichas estructuras son independientes del observador, lo cual habilitaría un enfoque a la vez realista y relacional (p. 9). No obstante, cabe preguntar en qué sentido las estructuras relacionales postuladas por OSR como los referentes de las teorías sean *objetivas*. En su conocido artículo, Ladyman (1998) ofrece una respuesta concisa:

Los objetos son identificados mediante la individuación de invariantes con respecto a las transformaciones relevantes para el contexto. Por lo tanto, en esta perspectiva, las partículas elementales son simplemente conjuntos de cantidades invariantes bajo los grupos de simetría de la física de partículas (p. 421).

Aquí yace el problema central con la propuesta de Candiotti, ya que RQM no parece permitir ningún tipo de invariancia matemática del tipo que está pensando Ladyman: la preservación de una estructura bajo un conjunto de transformaciones (Bitbol, 2007; Dieks, 2009; Pienaar, 2021a, 2021b; Robson, 2023). Tanto la mecánica clásica como el electromagnetismo y la relatividad especial poseen mecanismos de transformación precisos y bien definidos (el grupo de Galileo en el primer caso y el grupo de Lorentz en el segundo). En cambio la física cuántica no garantiza, al interior de su formalismo, el mismo tipo de invariancia.⁶

Esto implica que, en RQM, la analogía entre la noción filosófica de “perspectiva” y el concepto físico-teórico de “marco de referencia” no es exacta, ya que no hay una estructura invariante que pueda ser “aprehendida” por una multiplicidad de perspectivas. Pero si un sistema físico es identificado mediante una lista definida de “propiedades” y un “estado físico” implica necesariamente un valor invariante bajo una transformación, entonces ni siquiera es lícito utilizar la noción de “estado” para caracterizar un sistema cuántico, porque carecemos de traducciones consistentes entre marcos de referencias respecto de algún valor específico en el sistema (Bitbol, 2007, p. 2). La implicancia aquí no es que en RQM el conocimiento sea relativo sino que, directamente, el conocimiento es *imposible*, ya que ni siquiera parece factible establecer un referente estable para la teoría.

⁶ Por su parte, en la relatividad general, la invariancia es generalizada a cualquier transformación de coordenadas suaves (*difeomorfismos*), lo que significa que las leyes físicas son invariantes frente a cambios en la representación matemática de la estructura geométrica del espacio-tiempo y el campo gravitatorio, representados por el tensor métrico $g_{\mu\nu}$.

Por la misma razón Pienaar (2021a) critica la analogía entre RQM y la Relatividad Especial. Desde su perspectiva, el mérito de Einstein no fue negar el carácter absoluto del espacio y el tiempo, sino justamente encontrar *nuevos absolutos*: los intervalos invariantes de la relatividad especial y las multiplicidades riemannianas de la relatividad general (p. 5). Aquí las relaciones son “objetivas” (esto es, independientes de los sistemas de referencia), lo cual significa que existe una transformación posible (mediante las ecuaciones de Lorentz) bajo la cual estas relaciones son invariantes. En la misma dirección van Muciño, Okon y Sudarski (2015) al establecer que “RQM no tiene una forma coherente de comparar diferentes descripciones de una misma secuencia de eventos. [...] Lo único que RQM puede establecer es que la perspectiva de un observador será consistente consigo misma” (p. 22).

Como toda información es relativa a un observador, la única forma de comparar dos perspectivas es desde la perspectiva de un tercer observador: las perspectivas de A y B sobre S son sólo comparables desde la perspectiva de C. Pero ¿qué ocurre si B interactúa directamente con A? ¿No podría B adquirir información sobre la perspectiva de A sobre S para comparar ambas perspectivas? La respuesta, como admite el propio Rovelli, es negativa.

Supongamos que A mide un sistema S y obtiene la información I_A^S sobre el estado de S. ¿Qué posibilidades tiene B de acceder a esta información? Primero, B mide S sobre la misma base que A, para obtener la información I_B^S . Luego, B podría interactuar con A para comparar las mediciones, lo cual arrojaría como resultado otra información I_B^A .⁷ Hay aquí tres casos de *información relativa*: I_A^S , I_B^S y I_B^A y todas ellas son acerca del estado de S. Pero todo lo que puede decirse desde RQM es que I_B^S y I_B^A serán *internamente consistentes* (Rovelli & Adlam, 2022, pp. 2-3); no puede establecerse ninguna relación entre estas informaciones y la perspectiva original de A reflejada en I_A^S .

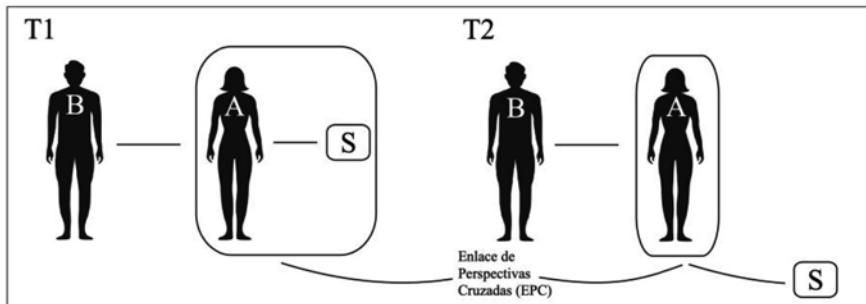


Imagen 2
Informaciones relativas bajo Descripciones Internamente Consistentes (DIC)

⁷ Recordemos que, en su espíritu naturalista, Rovelli entiende el “acuerdo intersubjetivo” entre observadores como “mediciones mutuas entre observadores” (Rovelli y Adlam, 2022, p. 14).

De modo que en RQM, la única forma de comparar mediciones es si éstas son relativas a un *mismo* observador, lo cual, como señalaban Muciño, Okon y Sudarski (2015), es una forma de solipsismo cuántico, porque las mediciones de B sólo coinciden entre sí, sin que B logre nunca saber lo que midió A. Si esto es así, la “información relativa” parece ser un concepto insuficiente para dar cuenta del conocimiento objetivo de la realidad física, en tanto parece incapaz de reflejar, en esta formulación, el hecho de dar *diferentes perspectivas* de una *misma* realidad física, incluso si dicha realidad está relationalmente constituida.

Lo que revela este análisis es una tensión fundamental entre los compromisos básicos de RQM y la posibilidad de una lectura realista. En efecto, como vimos, Rovelli pretende construir su interpretación como un camino a la vez “realista” y “relacional”, pero para ello necesita tanto de TREL como de TE, respectivamente. El problema es que la conjunción de la tesis de relationalidad (todo estado es *relativo* a un observador) y la tesis de equivalencia (todo observador es un sistema) genera inevitablemente una regresión al infinito (Bitbol, 2024) o lo que Riedel (2024) denominó una “iteración irrestricta” de la relatividad. Esto ocurre porque la relatividad se extiende al observador que, en definitiva, no es más que otro eslabón en la cadena interminable de informaciones relativas, de modo que no sólo la descripción de A es relativa a B, sino que la descripción “el estado de A relativo a B” es asimismo relativa a un tercer observador C, y así *ad infinitum*:

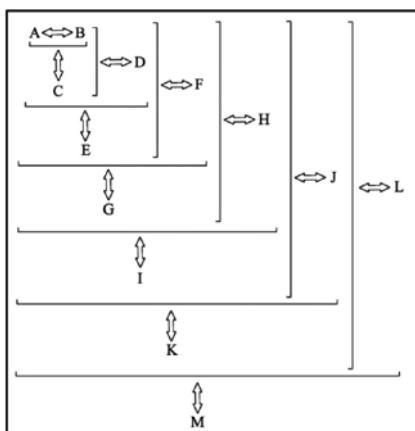


Imagen 3
Iteración infinita de hechos relativos constituidos por información relativa

Los resultados de permitir esta iteración son, efecto, catastróficos, puesto que, llevada hasta sus últimas consecuencias, dicha iteración implica que no es posible siquiera determinar *un sólo* hecho cuántico, ya que la mínima descripción de estado, para ser completa, demanda una referencia a una secuencia infinita de observadores (Adlam, 2025; Pienaar, 2021a; Riedel, 2024; Rovelli, 2024).

Frente a esta situación, se vuelve evidente la necesidad de detener la iteración en algún punto. La pregunta es de qué posibilidades dispone Rovelli para cumplir este objetivo. En efecto, detener la iteración en cualquiera de los niveles implicaría “reintroducir alguna descripción absolutamente válida del estado dinámico de algún sistema” (Riedel, 2024, p. 112).

Detener la iteración del lado del “observador”, sustrayéndolo de la cadena infinita de informaciones –una estrategia que podría asimilarse al Qbismo (Pienaar, 2021b; Bitbol, 2024) – no es una opción viable para Rovelli, ya que esto implicaría echar por tierra TE. De modo que a Rovelli sólo le queda una opción: abandonar la premisa de que toda información es relativa. Para ello, introduce un nuevo postulado llamado “Enlace de Perspectivas Cruzadas” (Adlam & Rovelli, 2022), que aquí formularé como sigue:

(EPC) Sean ‘A’, ‘B’ y ‘S’ tres sistemas físicos, e $I_Y^{q(X)}$ la información del sistema Y sobre el valor de una variable q del sistema X. Si al interactuar con S, A obtiene la información $I_A^{q(S)}$, entonces existe un estado ‘ φ ’ de A que representa $I_A^{q(S)}$. Luego, si A no tiene ninguna interacción que destruya φ , entonces $I_B^{\varphi(A)} = I_A^{q(S)}$.

La interpretación física de este postulado es la siguiente: cuando A adquiere información sobre S, esta información queda físicamente almacenada en una variable de A. Mientras esta información permanezca intacta, se sigue que cuando B mide la variable física que representa la información de A sobre S, entonces B adquiere información “no sólo de la representación física del conocimiento de A, sino también del contenido de su perspectiva subjetiva, ya que ésta está codificada en variables físicas accesibles a B” (Adlam & Rovelli, 2022, p. 5).

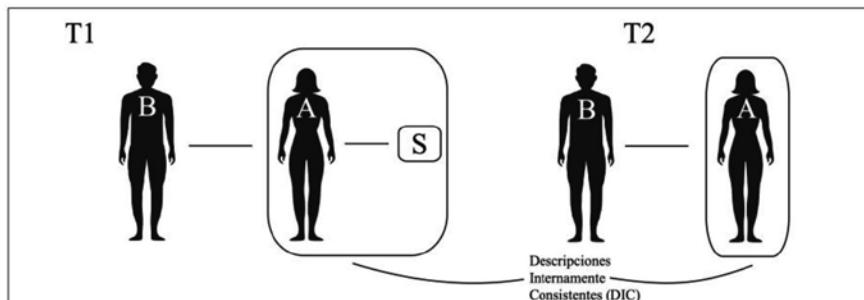


Imagen 4
Informaciones relativas según el Enlace de Perspectivas Cruzadas (EPC)

De acuerdo con este nuevo postulado, la información no es un estado “relativo” a un sistema (una “perspectiva subjetiva”), sino un hecho físico y esto debe entenderse

en términos de accesibilidad. Lo que garantiza EPC es la “transitividad” entre estas correlaciones: de la correlación entre B y A podemos llegar adquirir información sobre la correlación anterior entre A y S.

Como vimos, EPC introduce un elemento *absoluto* en RQM: $I_A^{q(S)}$ es independiente del observador (Adlam & Rovelli, 2022, p. 8) y por tanto ya no puede considerarse “información relativa”. Esto demanda, a su vez, una radicalización de la ontología, en la que la ocurrencia de la información es considerada un “evento cuántico”, esto es, la ocurrencia instantánea y discreta de una correlación entre procesos físicos que genera información cuántica. Dichos eventos “son independientes del observador” (Adlam y Rovelli, 2022, p. 1).

En este contexto, “la noción de un sistema no es necesariamente fundamental, sino que es empleada como una herramienta interpretativa que nos ayuda a dar sentido al conjunto de eventos cuánticos” que se relacionan mediante regularidades matemáticas (Adlam y Rovelli, 2022, p. 8). La información física constituye regularidades matemáticas que permiten, en el contexto de una teoría, aislar “sistemas físicos” como herramientas de análisis. Un sistema no es más que “un conjunto de eventos cuánticos” correlacionados por regularidades matemáticas caracterizables por un álgebra de variables físicas (Adlam y Rovelli, 2022, p. 8).

Según esta nueva ontología, la realidad física está compuesta por eventos cuánticos que son (i) *discretos* (no hay continuidad causal entre ellos), (ii) *absolutos* (independientes de todo observador) y (iii) *relacionales* (un evento cuántico consiste en una dinámica de interacciones que da lugar a la emergencia de sistemas físicos).⁸ El axioma fundamental de RQM permanece: no hay *estados* físicos independientes del observador, ya que todo estado es relativo a un sistema interactuante. Pero aquí surge una clara dificultad: si un “sistema” es definido al interior de un evento cuántico discreto, y no es un elemento de la realidad física que existe independientemente de este evento instantáneo, ¿cómo podemos afirmar que B está interactuando con *el mismo* sistema que antes interactuó con S, a saber, “A”? ¿Cómo debe entenderse la idea de que la información “queda almacenada” en A?

EPC garantiza que si B mide ϕ (una variable que representa la información que A tiene de una *interacción pasada* con S) el estado de A “coincidirá” con el estado de S. Pero no puede garantizar que el estado de A en la interacción *actual* con B sea *el mismo* que el estado de A en su interacción pasada con S, ya que se trata

⁸ En un artículo reciente, Adlam (2025) clasifica las interpretaciones relacionales como “efectivas” (si emergen como consecuencia de escenarios como el de Wigner, pero mantienen el carácter absoluto de algún estado cuántico, como en el caso de De Broglie-Bohm) e “inherentes” (si los estados son *en sí* relacionales, como en RQM). Asimismo, distingue entre relacionismo “de hechos” (la versión original de RQM) y relacionismo “de dinámicas” (donde los estados son relativos, pero no el hecho mismo de su interacción) (pp. 4-6). Para Adlam, la introducción de EPC en RQM resulta en un relacionismo “inherente” y “dinámico”, que contrasta con el modelo De Broglie-Bohm sólo en el hecho de que éste último es un relacionismo “efectivo” y no “inherente” (dados que la posición no es un estado relativo).

de dos estados diferentes producidos en dos flashes absolutos discontinuos y numéricamente diferentes. Como la granularidad de la ontología prohíbe que la información acerca del valor de q sea “transportada” de un sistema a otro por medios físicos, $I_A^{q(S)}$ y $I_B^{\varphi(A)}$ no representan *la misma* información ya que son dos interacciones diferentes. Si EPC garantiza que su valor coincide, esto sólo puede considerarse como un caso de acceso a la información *previamente* obtenida por A bajo una suposición no explicitada, a saber: que al medir A, B está accediendo al conocimiento que A obtuvo en el pasado acerca de S.

Así las cosas, la introducción de EPC parece más una solución *ad hoc* que un principio capaz de proveer una *comprensión* del fenómeno del conocimiento intersubjetivo del mundo.⁹ Se trata, en efecto de la introducción de un nuevo postulado por “fuerza bruta” (Riedel, 2024, p. 113) el cual garantiza que ambos valores se corresponden con una línea causal directa que, en realidad, no está garantizada en la ontología granular de RQM.

Dado que no es posible justificar (como lo haría el “realismo ingenuo”) la coincidencia de perspectivas sobre un sistema en términos de la existencia objetiva del sistema, lo único que nos queda por hacer es mostrar que la interacción informacional es un evento que puede ser experimentado intersubjetivamente. Sin embargo, dados los compromisos ontológicos del propio Rovelli, EPC no logra más que una coincidencia externa entre dos resultados causalmente aislados. Es por ello que, en su discusión con Pienaar, Rovelli sólo dispone de argumentos heurísticos para motivar la idea de que es posible la comparación intersubjetiva de perspectivas:

¿Acaso tengo evidencia directa de que otros seres humanos tienen una experiencia de primera persona como la mía? No. ¿Sería ésta una hipótesis “no motivada por la observación, que no sirve a un propósito explicativo”? ¡Por supuesto que no! La alternativa es el solipsismo. Del mismo modo, RQM señala que tenemos razones para creer que compartimos la realidad de nuestras perspectivas con otros sistemas físicos (Di Biagio & Rovelli, 2022, p. 14).

Es difícil ver cómo una ontología basada en la conformación instantánea de relaciones discretas puede mantenerse al mismo tiempo que se supone una concepción realista del conocimiento científico, incluso es su versión moderada. Y parece, asimismo, que reemplazar el carácter “relativo” de las informaciones por uno “absoluto” tampoco nos hace avanzar demasiado en esa dirección. En el fondo, da la impresión de que en su desarrollo actual, RQM no proporciona una forma satisfactoria

⁹ De un modo similar, Markiewicz y Źukowski (2024) han argumentando que la introducción del postulado EPC “solo puede ser interpretado como la introducción de variables ocultas a la mecánica cuántica” ya que parece “forzar causalmente la coincidencia” entre ambos $I_A^{q(S)}$ y $I_B^{\varphi(A)}$ (p. 6)

de concebir el conocimiento de una realidad que, aunque se presume constituida por relaciones, es aún pensada como *objetiva*. Todo lo que uno puede hacer es “una extrapolación razonable” (Di Biagio & Rovelli, 2022, p. 14) basada en la suposición –igualmente razonable– de que no hay sistemas especiales (TE) y que por lo tanto uno participa del mundo del mismo modo que otros seres. Pero esta “razonabilidad” sólo puede estar basada en un conjunto de fuertes intuiciones clásicas (acerca de un mundo compartido, estable, etc.), intuiciones cuya solidez, precisamente, ha sido ya socavada por la radicalidad ontológica a la que nos invita RQM.

6. Conclusión

A lo largo de su itinerario filosófico, Rovelli ha extendido su visión relacional a todos los aspectos de la realidad, defendiendo la idea de una visión comprensiva y naturalista que pueda dar cuenta no sólo de la estructura de la materia, sino también de nuestro conocimiento de ella. La clave para llegar a esta visión es el concepto de “información”, que Rovelli ve como un candidato capaz de complementar la *descripción* de la realidad física provista por el formalismo cuántico, con una *explicación* –interpretando físicamente sus términos– y una *comprensión* –unificando fenómenos como el significado y la intencionalidad a partir de la noción física de “información relativa”. En este artículo he intentado proveer un análisis detallado de la noción de “información” en RQM y de la noción de “conocimiento” que se desprende de ella, señalado las dificultades a las que se enfrenta la noción de “información relativa” (que está a la base de la formulación de Rovelli) para brindar tal imagen comprehensiva.

Ciertamente, el alcance y amplitud de las ambiciones filosóficas de Rovelli lo posicionan como una de las figuras más interesantes en la discusión actual en torno a los fundamentos de la física. Su decisión de asumir un posicionamiento explícitamente metafísico contrasta con otras interpretaciones más austeras que, aunque moderadas, carecen tal vez de la potencia filosófica que exhiben los textos de Rovelli y sus defensores. Sin embargo, como he intentado mostrar aquí, la radicalidad del salto no siempre nos conduce a un territorio deseable, y el modo problemático en que RQM articula la idea del “conocimiento” a partir del concepto de “información” muestran que Rovelli tiene aún claros desafíos en la construcción de una visión filosófica comprehensiva y coherente.

Referencias

- Adlam, E. (2025). What Kind of Relationality does Quantum Mechanics Exhibit? *arXiv*: 2502.06991v1 [quant-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.06991>

- Aikin, S. (2006). Pragmatism, Naturalism, and Phenomenology. *Human Studies*, 29(3), 317-340. <https://doi.org/10.1007/s10746-006-9026-5>
- Artmann, S. (2008). Biological information. In S. Sarkar & A. Plutynski (Eds.), *A Companion to the Philosophy of Biology* (pp. 22-39). Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9780470696590.ch2>
- Barrett, J.A. (2005), The Preferred-Basis Problem and the Quantum Mechanics of Everything. *British Journal of Philosophy of Science*, 56(2), 1-22. <https://doi.org/10.1093/bjps/axi114>
- Bitbol, M. (2007). Relations physiques ou relations fonctionnelles? Une lecture non-métaphysique de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique de Rovelli. En M. Bitbol, *De l'intérieur du monde. Pour une philosophie et une science des relations* (pp. 1-15). Flammarion.
- Bitbol, M. (2024). Relations and relativities: A Kantian approach to relational interpretations of quantum theory. *La Cultura, Rivista di filosofia e filologia*, 3, 409-434. <https://doi.org/10.1403/115370>
- Brukner, E. & Zeilinger, A. (2001). Conceptual inadequacy of the Shannon information in quantum measurements. *Physical Review A*, 63, 1-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.63.022113>
- Bub, J. (2005). Quantum Mechanics is About Quantum Information. *Foundations of Physics*, 35(4), 541-560. <https://doi.org/10.1007/s10701-004-2010-x>
- Candiotto, L. (2017). The reality of relations. *Giornale di Metafisica*, 2, 537-551.
- De Ronde, C. & Fernández Moujan, R. (2018). Epistemological vs. Ontological Relationalism in Quantum Mechanics: Relativism or Realism? In D. Aerts, M.L. Dalla Chiara, C. de Ronde and D. Krause (Eds.), *Probing the Meaning and Structure of Quantum Mechanics: Information, Contextuality, Relationalism and Entanglement* (pp.277-317). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789813276895_0015
- Di Biagio, A., & Rovelli, C. (2021). Stable Facts, Relative Facts. *Foundations of Physics*, 51:30. <https://doi.org/10.1007/s10701-021-00429-w1>
- Di Biagio, A., & Rovelli, C. (2022). Relational Quantum Mechanics is About Facts, Not States: A Reply to Pienaar and Brukner. *Foundations of Physics*, 52(3), 62. <https://doi.org/10.1007/s10701-022-00579-5>
- Dieks, D. (2009). Objectivity in Perspective: Relationism in the Interpretation of Quantum Mechanics. *Foundation of Physics*, 39, 760-775. <https://doi.org/10.1007/s10701-009-9293-x>
- Dorato, M. (2016). Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming. In A. Marmodoro & A. Yates (Eds.), *The Metaphysics of Relations* (pp. 290-324). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198735878.003.0014>
- Dretske, F. (1981). *Knowledge and the Flow of Information*. MIT Press.

- Dretske, F. (1983). Précis of Knowledge and the Flow of Information. *The behavioral and brain sciences*, 6, 55-90. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00014631>
- Einstein, E., Podolsky, B. & 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>
- Fuchs, C. A. (1962). Objective and subjective aspects of statistics in quantum description. In Körner, S. (Ed.), *Observation and interpretation in the philosophy of physics proceedings of the ninth symposium of the Colston Research Society*, Dover Publishing, pp. 197-203.
- Ladymian, J. (1998). What is Structural Realism? *Studies in History and Philosophy of Science*, 29(3), 409-424. [https://doi.org/10.1016/S0039-3681\(98\)80129-5](https://doi.org/10.1016/S0039-3681(98)80129-5)
- Lombardi, O. (2004). What is Information? *Foundations of Science*, 9(2), 105-134. <https://doi.org/10.1023/B:FODA.0000025034.53313.7c>
- López, C. & Lombardi, O. (2015). Información Clásica e información cuántica. *Scientiae Studia*, 13(1), 143-174. <https://doi.org/10.1590/S1678-31662015000100007>
- Markiewicz, M. & Żukowski, M. (2024). Relational Quantum Mechanics with Cross-Perspective Links Postulate: An Internally Inconsistent Scheme. *arXiv*: 2312.07056v2 [quant-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.13338>
- Millikan, R., (2006). Styles of Rationality. In S. Hurley & M. Nudds (Eds.), *Rational Animals?* (pp. 117-126). Oxford University Press.
- Muciño, R., Okon, E., & Sudarski, D. (2015). Assessing Relational Quantum Mechanics. *arXiv*: 2105.13338 [quant-ph]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.13338>
- Pienaar, J. (2021a). A Quintet of Quandaries: Five No-Go Theorems for Relational Quantum Mechanics. *Foundation of Physics* 51(5), 97. <https://doi.org/10.1007/s10701-021-00500-6>
- Pienaar, J.L. (2021b). QBism and relational quantum mechanics compared. *Foundations of Physics*, 51(5), 96. <https://doi.org/10.1007/s10701-021-00501-5>
- Riedel, T. (2024). Relational Quantum Mechanics, quantum relativism, and the iteration of relativity. *Studies in History and Philosophy of Science*, 104, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2024.02.007>
- Robson, C. (2023). Relational Quantum Mechanics and Contextuality. *arXiv*: 2308.08922 [quant-ph]. <https://doi.org/10.1007/s10701-024-00788-0>
- Rouse, J. (2002). *How Scientific Practices Matter: Reclaiming Philosophical Naturalism*, Chicago University Press.
- Rovelli, C. (2015). Relative Information at the Foundation of Physics. In A. Aguirre, B. Foster, Z. Merali (Eds), *It From Bit or Bit From It?* (pp. 79-86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12946-4_7

- Rovelli, C. (1996a). Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics*, 35(8), 1637-1678. <https://doi.org/10.1007/BF02302261>
- Rovelli, C. (2016a). Meaning: information + evolution. *arXiv:1611.02420v1[physics.hist-ph]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1611.02420>
- Rovelli, C. (2016b). A response to the Muciño-Okon-Sudarsky's Assessment of Relational Quantum Mechanics. *arXiv: 2106.03205* <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.03205>
- Rovelli, C. (2018a). 'Space Is Blue and Birds Fly through It'. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376 (2123): 20170312. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0312>
- Rovelli, C. (2018b). Physics Needs Philosophy. Philosophy Needs Physics. *Foundation of Physics*, 48, 481-491. <https://doi.org/10.1007/s10701-018-0167-y>
- Rovelli, C. (2019). Neither Presentism nor Eternalism. *Foundations of Physics*, 49(12), 1325-1335. <https://doi.org/10.1007/s10701-019-00312-9>
- Rovelli, C. (2021). *Helgoland. Making sense of the quantum revolution*, [trad. Segre, E. and Carnell S.] Riverhead Books.
- Rovelli, C. (2024). Princeton seminars on physics and philosophy. *arXiv: 2407.01989 [physics.hist-ph]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.01989>
- Rovelli, C. & Adlam, E. (2022). Information is Physical: Cross-Perspective Links in Relational Quantum Mechanics. *arXiv: 2203.13342 [quant-ph]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.13342>
- Schrödinger, E. (1967). *What is life*. Cambridge University Press.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press.
- Van Fraassen, B. (2010). Rovelli's world. *Foundations of Physics*, 40, 390-418. <https://doi.org/10.1007/s10701-009-9326-5>
- Vila, J. (2015), *La paradoja de la racionalidad*. Teseo Press.
- Wood, D. (2010). Everything is relative: Has Rovelli found the way out of the woods? manuscrito inedito: https://dwolf.eu/uploads/2/7/1/3/27138059/rqm_essay_dwood.pdf