



El poder de distinguir: el caso de Relatividad General

*The Heuristic Power of Theory Classification:
the case of General Relativity*

O poder heurístico da classificação de teorias: o caso da Relatividade Geral

Diego Maltrana

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

diego.maltrana@pucv.cl

0000-0003-2550-5243 

Nicolás Sepúlveda-Quiroz

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

→ **Recibido:** 30 / 09 / 2025

→ **Aceptado:** 11 / 12 / 2025

→ **Publicado:** 20 / 01 / 2026

→ **Artículo Dossier**

"Filosofía y Fundamentos de la Física"

© 2026 Diego Maltrana; Nicolás Sepúlveda-Quiroz

CC BY 4.0

→ **Cómo citar:** Maltrana, D., & Sepúlveda-Quiroz, N. (2026).

El poder de distinguir: el caso de Relatividad General.

Culturas Científicas, 6(1), pp. 230-258].

doi.org/10.35588/cc.v6d7929

[RESUMEN]

En este artículo exploramos cuán poderosa es la distinción entre teorías estructurales y teorías mecanicistas mediante su uso en el análisis de la Relatividad General. Se ha propuesto que toda teoría científica o elemento teórico puede clasificarse en uno de sólo dos grupos, cada uno de ellos implica elementos ontológicos, epistémicos y funcionales distintivos. Siendo así, bastaría con identificar el grupo al que pertenece una teoría para conocer a priori sus alcances y limitaciones en estas áreas (ontológico, epistémico y funcional) sin necesidad de entrar en un análisis técnico detallado. Para mostrar el punto, usamos como caso de estudio la Relatividad General y, previo a cualquier análisis técnico, mostramos que somos capaces de anticipar su contenido ontológico, epistémico y funcional, el que luego corroboramos analizando en detalle ciertos elementos técnicos. Con esto, intentamos defender el uso de la distinción como una poderosa herramienta para el análisis científico y filosófico.

[PALABRAS CLAVES]

Teorías marco, teorías de interacción, relatividad general; naturaleza de la gravedad; naturaleza del espacio-tiempo.

[ABSTRACT]

In this article, we explore the heuristic power of the theoretical distinction between structural and mechanistic theories applied to the case of General Relativity. According to the distinction, theories and theoretical elements can be classified into two different groups, each with clear ontological, epistemic, and functional content. Being so, to identify the group to which a theory belongs would suffice to know a priori its prospects and limitations in these areas without going into a detailed technical analysis. We make the exercise here with General Relativity, anticipate its ontological, epistemic, and functional content, and show afterwards that such expectations are justified in this case, being consistent with formal issues of General Relativity. With this, we attempt to make a case for the use of the distinction as a powerful tool for scientific and philosophical analysis.

[KEY WORDS]

Framework theories, interaction theories, general relativity; nature of gravity; nature of space-time.

1. Introducción

A estas alturas es innegable que la ciencia moderna incluye poderosas teorías de un éxito empírico sin precedentes. Pese a ello, algunas de estas teorías han resultado ser difíciles de interpretar. El cómo dar significado a su contenido formal, cómo identificar sus limitaciones epistémicas, su importancia ontológica, hasta qué punto es razonable reíficar las estructuras matemáticas o cuáles de ellas, cuánta confianza debe depositarse en la existencia objetiva o material de los elementos no observables que implica la teoría, son cuestiones que juegan un rol en diferentes interpretaciones de varias teorías actuales.

Existen diversas formas de abordar diferencias de interpretación, quizá la más habitual sea llevar a cabo un análisis minucioso de los detalles técnicos a partir de los cuales se construyen los argumentos a favor (o en contra) de determinadas interpretaciones. Hay muchos ejemplos de este enfoque en la literatura, entre ellos aquellos que argumentan en favor de una u otra posición sobre la naturaleza de los campos de gauge o el carácter no separable de la mecánica cuántica a partir del análisis del efecto Aharonov-Bohm (Healey, 1997; Belot, 1998; Maudlin, 1998; Wallace and Timpson, 2010), argumentos a favor o en contra del substantivalismo del espacio-tiempo a partir del análisis de resultados de Relatividad General, como lo es el argumento del agujero (Macdonald, 2001; Hoefer, 1996; Norton, 1988; Earman and Norton, 1987), o el papel que juegan procesos de decoherencia en distintas interpretaciones de la mecánica cuántica (Bacciagaluppi, 2020; Wallace, 2010; Adler, 2003; Blanchard et al., 2000), el rol de las suposiciones en la derivación de las ecuaciones de entropía, como la llamada ‘*Stosszahl anzatz*’, o la distinción de grano grueso y grano fino en estadística, entre muchas otras cuestiones técnicas que desempeñan un papel en la interpretación de los enfoques de Gibbs y Boltzmann de la mecánica estadística y el problema de la flecha del tiempo (Lavis, 2005; Brown and Uffink, 2001; Price, 1996), el teorema de Hagg en Teoría Cuántica de Campos (Romero-Maltrana et al., 2018), la dirección explicativa implicada por los teoremas de Noether respecto a la relación entre simetrías y cargas conservadas (Van Fraassen, 1989; Hojman, 1992; Brown and Holland, 2004; Ryder, 2006; Lange, 2007; Smith, 2008; Romero-Maltrana, 2015). Este ejercicio podría prolongarse hasta la saciedad. Sin embargo, y este es el punto central de este trabajo, también es posible abordar cuestiones interpretativas a partir de argumentos filosóficos completamente generales, sin apelar a detalles técnicos presentes en cada teoría. Este trabajo toma la segunda ruta, y explora el poder heurístico de una clasificación teórica propuesta por Einstein y posteriormente refinada por Flores, y por Maltrana, Benítez y Herrera.

En primer lugar, en la sección 2, introducimos la distinción entre teorías mecanicistas y teorías estructurales; a continuación, en la sección 3, utilizamos dicha distinción para predecir el contenido ontológico, epistémico y funcional de la Relatividad General (RG) en cada caso, para argumentar más adelante, en la sección 4, que RG corresponde a una teoría estructural. Pese a que RG se considera la mejor teoría de la gravedad disponible y la gravedad se considera una interacción (vinculadas a mecanismos), mostramos cómo las predicciones realizadas en la sección 3 son coherentes con los resultados formales de RG en la sección 5. La sección 6 analiza los futuros experimentos que intentarán demostrar la naturaleza cuántica de la gravedad, los que tendrán una enorme relevancia sobre las conclusiones extraíbles del carácter estructural de RG. Las conclusiones de nuestro estudio se resumen en la sección 7.

2. Teorías mecanicistas y estructurales

Según Einstein (1919), Flores (1999) y Maltrana, Herrera y Benítez (2022), las afirmaciones científicas pueden clasificarse en dos tipos diferentes de teorías, cada una de las cuales desempeña funciones teóricas diferentes, tiene un contexto de descubrimiento propio, proporciona un tipo de explicación particular y contiene elementos teóricos que vinculados a ontologías distintas. Estas diferencias son independientes del contenido de la teoría, es decir, son independientes de la parte de la realidad que pretenden describir o del tipo de fenómenos que pretenden «salvar».

La distinción mencionada se ha utilizado de una forma u otra en debates sobre una amplia gama de temas, no solo en el contexto de la relatividad especial (RE), donde Einstein popularizó la distinción¹, sino que también aparece en el contexto de las interpretaciones de la mecánica cuántica (Bub and Demopoulos, 1974; Bub, 2000, 2005; Clifton et al., 2003; Brown and Timpson, 2006; Plotnitsky, 2015; Felline, 2018), la Gravedad Cuántica (Smolin, 2017), las interpretaciones de la teoría cuántica de campos y el modelo estándar I (Romero-Maltrana et al., 2018; Benítez, 2019), en explicaciones científicas (Van Camp, 2011; Lange, 2011, 2014) o en biología (Schaffner, 1969). Aquí daremos por sentadas las consecuencias de la distinción, la que indica que se pueden (o se deben) esperar cosas diferentes de teorías o elementos teóricos pertenecientes a distintos grupos, y emplearemos la clasificación de Maltrana, Benítez y Herrera (2022) en términos de mecanismos y estructuras, quienes refinaron el análisis y la propuesta de Flores (1999), el que a su vez había refinado la propuesta original de Einstein (1919).²

Las teorías o elementos teóricos estructurales desempeñan un papel regulador en la formulación de diferentes teorías mecanicistas; los elementos implicados corresponden a propiedades de los sistemas que imponen restricciones a procesos, pero no refieren a propiedades de entidades. Surgen de regularidades empíricas que se toman como axiomas a partir de los cuales se construye deductivamente la teoría, proporcionando explicaciones descendentes. Por el contrario, las teorías o elementos teóricos mecanicistas dan cuenta de los fenómenos en términos causales, mediante la descripción de los agentes involucrados y de las interacciones entre ellos (a lo que llamamos «mecanismos»). Las teorías mecanicistas están restringidas/limitadas por teorías estructurales (este último grupo puede aparecer explícitamente o no); los elementos implicados son agentes, es decir entidades o sustancias, y las propiedades de esas entidades o sustancias. Estas teorías se desarrollan de forma constructiva a partir de entidades hipotéticas o propiedades

¹Hay varios lugares en los que se discute la interpretación de Relatividad especial, donde la distinción entre teorías estructurales o mecanicistas (o teorías constructivas y principios) tiene un papel importante. Un ejemplo muy discutido es el llamado debate Brown-Janssen (véase [26-32]), sin embargo, hay una diferencia importante entre nuestro enfoque del problema y cómo se ha planteado el debate Brown-Janssen. El debate Brown-Janssen se articula en términos de la distinción entre cinemática y dinámica (oponiéndose a la naturaleza cinemática de la RE y al enfoque dinámico de la teoría de Lorentz), y se centra principalmente en el poder explicativo de cada teoría. Ciertamente, la naturaleza cinemática de Relatividad Especial está relacionada con el hecho de que es una teoría estructural, mientras que la teoría dinámica de Lorentz corresponde a una teoría mecanicista; sin embargo, cuando se aborda el problema desde la distinción entre teorías estructurales o mecanicistas, la discusión ya no se limita a la dimensión epistémica (explicativa), sino que también destaca las diferencias ontológicas y funcionales que son relevantes para nuestros propósitos. En este sentido, nuestra opinión se acerca mucho más a la de Camp [31], quien, al analizar la disputa entre Brown y Janssen, destacó el papel funcional estructural de Relatividad Especial, siguiendo a DiSalle [33].

²Es importante destacar que en Maltrana, Benítez y Herrera (2022), además de refinar la distinción, se construye un argumento en favor del carácter categórico de la distinción, es decir, de la imposibilidad de que una genuina teoría mecanicista en cierto contexto, sea una genuina teoría estructural en otro contexto.

de entidades, proporcionando explicaciones ascendentes.

Las teorías mecanicistas son teorías o elementos teóricos que refieren a la forma en que agentes (entidades) interactúan. En última instancia, este grupo de teorías pueden reconocerse porque, en algún grado, develan la cadena causal responsable de los fenómenos estudiados mediante la descripción de las interacciones subyacentes, es decir, proporcionan explicaciones causales (ascendentes). En física, dicha interacción está vinculada a la transmisión de alguna cantidad que se conserva globalmente (momento, energía, espín, carga) y, cuando se trata de fuerzas fundamentales, la cantidad transferida es el momento³. Por lo tanto, su ontología incluye forzosamente entidades interactuantes (que intercambien momento).

Por el contrario, las teorías estructurales pueden identificarse pues el tipo de explicaciones que se pueden construir a partir de ellas son unificadoras (descendentes), pues aquello que las caracteriza es que proporcionan restricciones estructurales a las teorías mecanicistas. Como no hay interacción que explicar, las teorías estructurales se refieren a los fenómenos en términos de las regularidades observadas que se asumen como principios o leyes de los que se deducen otras conclusiones, sus elementos teóricos no se refieren a entidades interactuantes de ningún tipo, sino más bien a restricciones o regularidades generales que debe respetar cualquier interacción enmarcada por la teoría.

Es importante destacar que las teorías estructurales y mecanicistas, pese a ser distinguibles, suelen aparecer en conjunto, explícita o implícitamente, cada vez que son aplicadas. Por ejemplo, las 3 leyes de Newton pueden entenderse, en conjunto, como una teoría estructural (la mecánica newtoniana). Por otro lado, la ley de gravitación universal corresponde a una teoría mecanicista, ahora bien, la segunda ley de Newton no permite calcular trayectorias sin que previo a ello se especifique la fuerza involucrada. De la misma forma, no sirve de nada la ley de gravitación universal por sí sola, si no está inmersa en la segunda ley de Newton para poder calcular trayectorias de planetas o de manzanas que caen. Lo mismo pasa en cuántica, la relación estructural reflejada en la ecuación de Schrödinger no permite hacer ningún cálculo antes de establecer un potencial, en el que se identifica el tipo de interacción. Dependiendo de ese potencial, la misma ecuación de Schrödinger permite describir cosas tan distintas como átomos (si el potencial es coulombiano), núcleos atómicos (si el potencial es de Yukawa), o moléculas complejas (si el potencial es efectivo, tipo Lennard-Jones), y cada uno de esos potenciales de interacción, que son teorías mecanicistas, son incapaces por si solas de entregar descripciones útiles sin tomar en cuenta la estructura de, en este caso, la mecánica cuántica.

Iniciamos esta sección mencionando que la distinción aparece en escritos de Einstein, de Flores y de Maltrana, Benítez y Herrera, lo que no mencionamos es que hay sutiles diferencias en cada aproximación, cada nuevo trabajo ha refinado ciertos aspectos del anterior, pero lo medular en la distinción es esencialmente idéntica en los tres casos. Las tres aproximaciones difieren en el criterio que permite clasificar cada teoría en uno de dos grupos, pero las características ontológicas, epistémicas y funcionales de cada grupo se mantienen (y comparten) en cada una de las refinaciones. Por ello, pese a que las refinaciones están justificadas, es posible emplear cualquiera de los tres criterios: ontológico, funcional o epistémico, pues estos dominios están estrechamente vinculados.

Una vez identificada la clase de teoría en cuestión, ya sea estructural o mecanicista, se

³El criterio de transferencia de momentum es especialmente adecuado para teorías físicas, véase (Aronson, 1971; Fair, 1979; Dowe, 2000).

conocen inmediatamente algunas características ontológicas, epistémicas y funcionales de la teoría, incluso sin necesidad de un análisis detallado de la teoría en cuestión.

2.1. Características de una Interacción

Antes de analizar nuestro caso de estudio armados con la herramienta de la distinción entre teorías, nos interesa aclarar a qué nos referimos con 'interacción', para lo cual volcaremos nuestra atención a cómo se habla de fuerzas en física.

Una forma de expresar la segunda ley de Newton es afirmar que la suma vectorial de todas las fuerzas externas ejercidas sobre un objeto es igual al cambio de momento del objeto. Obsérvese que esta versión de la segunda ley de Newton no requiere ningún cambio al pasar de la mecánica clásica a la Relatividad Especial (RE), ya que no se ha declarado ninguna forma particular de 'momento'⁴.

La tercera ley de Newton afirma que la fuerza que un objeto ejerce sobre otros es igual en magnitud y opuesta en dirección a la que el segundo objeto ejerce sobre el primero. Tanto la tercera como la segunda ley combinadas implican que las fuerzas son interacciones entre (al menos) dos objetos físicos, y que dicha interacción conduce al intercambio de momento entre esos objetos.

Desde la época de Newton, la mecánica clásica ha sido sustituida por la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica; sin embargo, nos gustaría destacar que la conclusión antes mencionada sobre las fuerzas ha sobrevivido a los cambios de marco o estructura teórica. Es cierto que la definición de momento cambió con la relatividad especial y que, gracias a la mecánica cuántica de campos, ahora sabemos que el intercambio de momento es mediado por la creación/aniquilación de bosones, algo completamente diferente de lo que pudiera haber entretenido la mente de Newton en su época. Sin embargo, a pesar de los muchos cambios que ha sufrido la idea de fuerza, sigue correspondiendo a la interacción de (al menos) dos objetos físicos que conduce al intercambio de momento entre ellos. Utilizamos aquí el término «objeto físico» en un sentido amplio, incluyendo partículas, campos y cualquier otra entidad que pueda existir independientemente de sujetos sensibles, teorías o estados mentales. Debido a su estabilidad histórica a lo largo de las teorías físicas, consideramos que esta conclusión es incontrovertible y una forma distintiva de reconocer las interacciones físicas a un nivel fundamental. Esto será importante para lo que viene a continuación.

3. Aplicación de la distinción al caso de Relatividad General

Esta sección es la más breve del artículo y el núcleo de nuestra contribución. El resto del manuscrito tiene por objeto demostrar que lo que aquí se predice, aunque contraintuitivo, es

⁴Si el momento se considera como $\vec{P} = m\vec{v}$, entonces la segunda ley implica que $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ es un invariante Galileano y la tercera ley de Newton se cumple, sin embargo, con esa definición de momento, la tercera ley de Newton no es invariante ante transformaciones de Lorentz y, por lo tanto, es incompatible con relatividad especial. No obstante, si el momento se considera como $\vec{P} = \gamma m\vec{v}$, entonces tanto la segunda como la tercera ley de Newton son invariantes bajo las transformaciones del grupo de Poincaré de relatividad especial.

cierto.

Si la distinción entre teorías estructurales y teorías mecanicistas es válida, entonces RG puede pertenecer a sólo uno de los dos grupos de teorías. Por un lado, si RG corresponde a una teoría mecanicista entonces tendría que describir una interacción particular. Se dice generalmente que RG es la mejor teoría de gravitación que tenemos, por lo que parece sensato pensar que, de ser una teoría mecanicista, versaría sobre la gravedad. Si ese fuese el caso, entonces RG debería proporcionar información sobre el tipo de entidades y/o la propiedad de las entidades responsables de las interacciones gravitacionales, esto es, si RG es una teoría de interacción, y si la distinción teórica entre teorías mecanicistas y estructurales es tan poderosa como presuponemos, entonces, incluso antes de cualquier análisis detallado, ya sabríamos que podemos esperar de RG información sobre qué tipo de entidades interactúan (este es el contenido ontológico), qué tipo de propiedad de dichas entidades es causalmente responsable de la interacción y los detalles o características de cómo se lleva a cabo dicha interacción (este es el contenido funcional). Una actitud realista hacia RG sugeriría aceptar tanto la existencia de tales entidades como la descripción de la forma en que interactúan (en términos de la discusión antes mencionada sobre las fuerzas).

En cuanto al contenido epistémico, el tipo de explicaciones que se esperaría que proporcione RG en tal caso son ascendentes, es decir, se esperaría que RG revele el mecanismo causal detrás de los fenómenos gravitacionales⁵.

Por otro lado, si RG fuese una teoría estructural, entonces su función sería imponer restricciones modales a (probablemente muchas) teorías de interacción. Además, no podría proporcionar información sobre ninguna interacción en particular, ni siquiera sobre las interacciones gravitacionales (contrariamente a su fama), y debería permanecer silente respecto a la naturaleza de las entidades involucradas en cualquiera de las interacciones enmarcadas por ella, ya que solo impondría restricciones a otras teorías (este carácter nomológico es su contenido ontológico). Por lo tanto, si RG fuese una teoría estructural, la imagen de un espacio-tiempo curvo, causalmente responsable del movimiento de los planetas y la caída de las manzanas, no sería una consecuencia necesaria de la teoría, sino una mera posibilidad entre otras, como la existencia de gravitones como agente causalmente responsable de las caídas de las manzanas y las órbitas de los planetas. Ninguna de esas posibilidades se deriva de RG (aunque podrían ser compatibles con ella).

Por último, en términos epistémicos, si RG corresponde a una teoría estructural, entonces solo cabría esperar explicaciones descendentes o unificadoras, y ningún mecanismo causal debería aparecer en ninguna explicación construida únicamente a partir de RG.

En resumen, si RG es una teoría estructural, entonces no puede ser una teoría de la interacción gravitacional, no puede explicar cómo las entidades sujetas a interacciones gravitacionales cambian su momento. Si RG es una teoría estructural, entonces no puede decir nada sobre la naturaleza física del espacio-tiempo, ni explicar cómo interactuaría tal cosa con la materia.

⁵Aquí nos referimos al contenido epistémico de la distinción de una manera diferente a la propuesta en Flores (1999). Lo que Flores tenía en mente era el «contexto del descubrimiento» cuando hablaba de la dimensión epistémica de la distinción, sin embargo, argumenta (como conclusión de su trabajo) que cada teoría tiene una forma de explicación relacionada, a saber, ascendente o descendente, y creemos que éste es un contenido epistémico mucho más rico de la distinción que el contexto del descubrimiento, es de hecho el criterio de distinción para refinación que propusimos el 2022.

Se puede decir mucho sobre los resultados ontológicos y epistémicos de la teoría sin entrar en detalles técnicos si la distinción entre teorías es tan poderosa como presuponemos. A continuación, argumentaremos que RG corresponde efectivamente a una teoría estructural y, por lo tanto, se espera el segundo conjunto de predicciones, y luego mostraremos que tales predicciones se cumplen, concluyendo que la distinción tiene el potencial de ser una herramienta poderosa para el análisis filosófico y científico.

4. Relatividad general: una casa vacía para diferentes huéspedes

Como se indicó al final de la sección 2, es posible emplear cualquier de los tres criterios (ontológico, epistémico o funcional) para identificar teorías y clasificarlas. En este sentido, podemos seguir a Einstein y preguntarnos si la teoría surge de regularidades que son elevadas a axiomas o principios, lo que evidencia que la teoría es una teoría estructural o 'de principios' -en terminología del propio Einstein-, o si bien fue necesario especular sobre entidades hipotéticas, agentes causalmente responsables del fenómeno en estudio, en cuyo caso estaríamos en presencia de una teoría mecanicista o 'constructiva'. Del mismo modo podemos preguntarnos, siguiendo a Flores, si la función teórica de la teoría en cuestión es proveer de un marco estructural para otras teorías, lo que es evidencia de estar en presencia de una teoría estructural o 'de marco' -según la terminología de Flores-, o bien si la función teórica es dar cuenta de una interacción en particular, lo que es indicio de estar frente a una teoría mecanicista o 'de interacciones'. Por último, podemos preguntarnos qué tipo de explicación es posible construir con ellas, si permiten rastrear la concatenación de agentes e interacciones (mecanismos) que dan cuenta del fenómeno, en cuyo caso estamos en presencia de una teoría mecanicista, o si por el contrario el tipo de explicación que provee es unificadora, en cuyo caso estamos en presencia de una teoría estructural.

En el caso de RG, siendo fiel a su propio estilo, Einstein construyó la teoría basado en tres principios: el principio de equivalencia, el principio de covarianza general y el principio de consistencia⁶. Este solo hecho la hace una teoría estructural. Bajo el enfoque de Flores, habría que reconocer si la teoría es un marco general en el que habitan otras teorías o si por el contrario trata sobre una interacción en particular, y en este sentido, es claro que siendo RG la generalización de RE, forzosamente es un marco más amplio de lo que ya era la relatividad especial, lo que corrobora que sea clasificada como una teoría estructural.

Sin embargo, es considerada la mejor teoría disponible cuando se trata de fenómenos gravitacionales, y la gravedad es considerada una de las cuatro interacciones fundamentales en física, lo que sugeriría que es una teoría de interacciones. Pese a ello, y este era el objetivo de la subsección 2.1, la cualidad de 'interacción' de los fenómenos gravitacionales queda en suspenso en RG, y ciertamente son incompatibles con las conclusiones de la sección 2.1. Se ahondará en este punto más adelante en el texto, por el momento, nuestra intención es intentar identificar a RG ya sea como teoría mecanicista o estructural con la menor cantidad de elementos técnicos

⁶Los principios por sí solos no bastan para derivar de forma única RG, hay que tener en cuenta elementos adicionales (como la simplicidad) (Wald, 1984), por lo que la mayor parte de lo que se dice en este artículo sobre RG también es válido para una familia más amplia de teorías, de las cuales RG es solo una. No obstante, debido a su relevancia, el debate solo se referirá a RG.

posibles, para poder emplear las consecuencias de la distinción y ponerla posteriormente a prueba.

El objetivo de esta sección es entonces defender el carácter estructural de RG y mostrar por qué el hecho de que se considere una teoría de la gravitación podría no ser una contradicción. Para ello, debemos analizar dos de los principios sobre los que se construye RG.

4.1. Principio de covarianza

Como acabamos de mencionar en la introducción a esta sección, RG es una generalización de RE, en el sentido de que no se limita a los marcos de referencia inerciales, sino a cualquier marco posible. Esto se codifica en el ‘principio de covarianza’: las leyes físicas deben tener el mismo aspecto (deben conservar su forma) bajo cualquier transformación de coordenadas posible, y no solo bajo un conjunto específico de coordenadas (transformaciones de Lorentz). Esto se consigue utilizando coordenadas gaussianas, es decir, ampliando la descripción de las situaciones físicas para incluir también espacios curvos (Torretti, 2000).

Cabe señalar que todas las teorías físicas deben permanecer invariables bajo transformaciones de coordenadas arbitrarias de acuerdo con el principio de covarianza, no solo aquellas que regula una interacción particular (gravedad), sino toda posible ley física, toda posible interacción.

Quizás la forma más intuitiva de abordar la idea de que RG no es solo una teoría de la gravitación es destacar la conexión entre los espacios curvos de RG y el espacio- tiempo plano de Minkowsky de RE. Si ampliamos lo suficiente cualquier curva, esta se asemeja a una línea recta; de forma análoga, los espacios curvos pueden aproximarse a espacios planos a nivel local. Por lo tanto, un espacio tetradimensional con la signatura adecuada podría parecerse localmente al espacio-tiempo de Minkowski. Dado que la estructura proporcionada por las ecuaciones de Einstein, escritas en coordenadas gaussianas, es lo suficientemente general como para colapsar localmente en espacios planos de Minkowski, las conclusiones derivadas de RE se incluyen o recuperan naturalmente en RG.

RG posee una estructura más rica que RE, pues la primera contiene a la segunda y, por lo tanto, es compatible con ella⁷. Dado que RG provee estructura para todas las interacciones macroscópicas descritas por la mecánica newtoniana, el electromagnetismo, la física molecular, atómica o nuclear, y todas las leyes físicas posibles describibles en marcos de referencia inerciales (este es uno de los principios tomados como axiomas para la teoría), entonces RG también provee estructura (una más rica) a esas leyes físicas, corresponde a una estructura más amplia que incluye todas las interacciones posibles, proporcionando restricciones estructurales adicionales a todas las interacciones particulares que ya tienen una descripción madura en espacios planos para una versión generalizada en todos los marcos de referencia posibles, sean inerciales o no.

El argumento mencionado anteriormente es quizás intuitivo, especialmente para aquellos

⁷Aunque nuestro objetivo es destacar el papel estructural de RG sobre las interacciones bien definidas en el espacio-tiempo de Minkowski, cabe señalar que se ha cuestionado hasta qué punto RG es estrictamente reducible a RE a nivel local. Por ejemplo, Read et al. (2018) sostienen que las derivadas superiores de la métrica no desaparecen en un punto bajo ciertas formulaciones del principio de equivalencia, y afirman que esto tiene consecuencias para la relación entre RG y RE.

que están familiarizados con RE, pero es innecesario, ya que existe una forma relativamente sencilla de hacer que cualquier teoría física que ya es compatible con RE también sea compatible con RG. Este es un contenido estándar de los libros de texto: para cualquier densidad lagrangiana de la materia L

«... la expresión covariante para L_M puede encontrarse a partir de la expresión relativista sustituyendo las derivadas parciales por sus derivadas covariantes. Esto introduce en la expresión los símbolos de Christoffel, es decir, las derivadas de la métrica». (Øyvind and Hervik, 2007, p.183, traducción propia)

«Matemáticamente, lo que significa el principio de equivalencia de Einstein es, en términos generales, que si tenemos una ley física local que se expresa en notación tensorial en RE, entonces su forma matemática debería ser la misma en un marco localmente inercial de un espacio-tiempo curvo. Este principio se denomina a menudo la «regla de la coma que se convierte en punto y coma», porque si una ley contiene derivadas en su forma relativista («comas»), entonces tiene estas mismas derivadas en el marco inercial local. Para convertir la ley en una expresión válida en cualquier marco de coordenadas, simplemente hacemos que las derivadas sean covariantes («puntos y comas»). Es una forma extremadamente sencilla de generalizar las leyes físicas». ⁸ (Schutz, 2009, p.173-174, traducción propia)

Además, existe una forma de calcular el tensor de energía-momento relacionado $T_{\mu\nu}$ a partir de una densidad lagrangiana L_M dada, a saber⁹

$$T_{\mu\nu} = -\frac{2}{\sqrt{-g}} \left(\frac{\partial [\sqrt{-g}L_M]}{\partial g^{\mu\nu}} - \left\{ \frac{\partial [\sqrt{-g}L_M]}{\partial g^{\mu\nu}_{,\lambda}} \right\}_{,\lambda} \right)$$

Tal tensor de energía-momento satisfará las ecuaciones de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Así que puedes tomar cualquier lagrangiano (compatible con la relatividad especial) relacionado con la descripción de tu proceso físico favorito y encontrar a partir de él el tensor de energía-momento que satisfará las ecuaciones de Einstein. Los ejemplos clásicos (debido a su aplicación en cosmología) son los «fluidos perfectos», que se utilizan para describir no solo los fluidos ordinarios, sino también la radiación, gases y la energía del vacío¹⁰. Por lo tanto,

⁸Esta receta, también conocida como esquema de acoplamiento mínimo, no es, sin embargo, la única forma de generalizar las teorías a partir del espacio plano. Cabe señalar que la inclusión de otros términos de curvatura en las ecuaciones revela ambigüedades (ver Goenner (1984); Tino et al. (2020)). Al pasar de RE a RG, hay que tener en cuenta que pueden aparecer nuevas restricciones utilizando diferentes esquemas sobre el comportamiento de la materia en presencia de la curvatura del espacio-tiempo.

⁹Para más detalles sobre la derivación de todas las expresiones presentadas aquí y en los ejemplos de las siguientes notas al pie, véase Øyvind and Hervik 2007, p.179-190.

¹⁰La densidad lagrangiana corresponde a $L = -\rho$, siendo ρ la densidad propia (que es la energía en un marco de reposo local del fluido). Para dicha densidad lagrangiana, tras cambiar las derivadas por derivadas covariantes, el tensor de energía-momento se convierte en: $T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu}$, con “p” la presión isotrópica y u la cuadri-velocidad que caracteriza al fluido.

cosas tan diferentes como la radiación electromagnética, el polvo, la energía del vacío y el gas ultra relativista, todas las cuales pueden describirse como un fluido perfecto, son compatibles con el marco general de RG.

Más concretamente, no solo la física que subyace a la distribución de la materia/energía de diferentes tipos es compatible con el marco de RG, sino también las interacciones fundamentales.¹¹

El objetivo de esta sección es mostrar que RG proporciona restricciones estructurales a todas las interacciones físicas posibles, y no se refiere únicamente a la gravedad como fuerza (en el sentido discutido en la sección 2.1). La razón para identificar RG exclusivamente con la gravitación es un error promovido por la profunda importancia física del principio de equivalencia, que se discutirá a continuación.

4.2. Principio de equivalencia

Hasta ahora, el debate se ha centrado en el «principio de covarianza», que permite generalizar los marcos de referencia inerciales pasando de espacios planos a espacios curvos, pero se ha prestado poca atención a lo que Einstein definió como el «pensamiento más feliz» de su vida, codificado en el «principio de equivalencia».¹²

La gravedad parece ser diferente a otras fuerzas en el sentido de que todo se acelera por igual en un campo gravitatorio determinado, independientemente de la constitución del objeto, su masa, sus cargas de cualquier tipo o su estado energético. Este comportamiento universal contrasta radicalmente con cualquier otra fuerza de la naturaleza. Einstein se dio cuenta de que estar bajo la influencia de un campo gravitatorio sería equivalente e indistinguible de las descripciones realizadas dentro de marcos de referencia acelerados sin campo gravitatorio que actuara sobre ellos. Los marcos de referencia acelerados se codifican matemáticamente en espacios curvos utilizando coordenadas gaussianas.

Will (2006) afirma:

«El Principio de Equivalencia de Einstein [PEE] es el corazón y el alma de la teoría gravitacional, ya que es posible argumentar de forma convincente que, si el PEE es válido, entonces la gravitación debe ser un fenómeno de «espacio-tiempo curvo», es decir, los efectos de la gravedad deben ser equivalentes a los efectos de vivir en un espacio-tiempo curvo. Como consecuencia de este argumento, las únicas teorías de la gravedad que pueden encarnar plenamente el PEE son aquellas que satisfacen los postulados de las «teorías métricas de la gravedad»¹³

El poder de la intuición de Einstein es asombroso. La contribución de Ptolomeo, Copérnico,

¹¹Por ejemplo, el lagrangiano para el campo electromagnético es $L = -\frac{1}{4}F_{\alpha\beta}F^{\alpha\beta} = -\frac{1}{4}g^{\alpha\beta}g^{\mu\nu}F_{\mu\alpha}F_{\nu\beta}$, a partir de él, tras cambiar las derivadas por derivadas covariantes, el tensor de energía-momento se reduce a $T_{\mu\nu} = F_{\mu}^{\alpha}F_{\alpha\nu} - \frac{1}{4}g_{\mu\nu}F_{\alpha\beta}F^{\alpha\beta}$, el que nuevamente satisface las ecuaciones de Einstein.

¹²Existe más de una formulación del principio de equivalencia; para un análisis de la relación entre las diferentes versiones, véase Lehmkuhl 2021.

¹³Los postulados son: 1. El espacio-tiempo está dotado de una métrica simétrica. 2. Las trayectorias de los cuerpos de prueba en caída libre son geodésicas de esa métrica. 3. En marcos de referencia locales en caída libre, las leyes físicas no gravitacionales son las que se escriben en el lenguaje de relatividad especial.

Galileo, Kepler, Newton, Laplace y todos los grandes nombres de la historia de la gravitación queda cubierta y mejorada al señalar que la gravedad y los marcos acelerados son equivalentes. No solo es posible reproducir resultados anteriores, sino que también se predijeron y corroboraron nuevos fenómenos, como el que estrellas fijas se moverían en un eclipse, o que sería posible observar objetos distantes 'magnificados' por lentes gravitacionales. También dio solución a enigmas como la precesión del perihelio de Mercurio. RG es la mejor descripción disponible de fenómenos gravitacionales, por lo que no es de extrañar que la gente identifique RG con una teoría de las interacciones gravitacionales, sin embargo, no lo es.

RG es una teoría que restringe todas las leyes físicas posibles de manera que sean compatibles con todos los observadores posibles, incluso los que se aceleran. Por otro lado, afirma que los marcos de referencia acelerados son indistinguibles de los marcos inerciales sujetos a campos gravitacionales, pero eso no es exactamente una teoría de gravitación. RG no describe exclusivamente la gravedad, como se argumentó en la sección anterior.

Por un lado, decir que la gravedad es equivalente al fenómeno del «espacio-tiempo curvo» no es lo mismo que decir que el espacio-tiempo existe como una entidad física primordial, aunque no descarta esta posibilidad. La búsqueda de descripciones covariantes y el uso de espacios gaussianos no implican la existencia del espacio-tiempo como entidad física, del mismo modo que la posibilidad de describir las ecuaciones de Newton mediante ecuaciones diferenciales no implica la existencia de las diferenciales como entidad física. El espacio-tiempo de Minkowski es una estructura adecuada para las rotaciones hiperbólicas, que a su vez es una forma adecuada de abordar las transformaciones de Lorentz, pero de este hecho no se deduce necesariamente que el espacio-tiempo exista como una entidad independiente en el mundo¹⁴.

Con todo esto no queremos afirmar que se puede deducir de RG que el espacio-tiempo no existe como entidad, pues es sin duda compatible con la relatividad especial y general, lo que sí afirmamos es que no es estrictamente necesario comprometerse ontológicamente con el espacio-tiempo como sustancia para la formulación de la teoría (idea defendida por relationalistas del espacio-tiempo). Esto concuerda con el carácter estructural de RG. Las teorías estructurales no pueden postular entidades interactuantes, por lo que, si el espacio-tiempo existe como sustancia física con poderes causales, RG no es la teoría que lo describe. RG no dice nada sobre cómo el espacio-tiempo se comunica con los objetos físicos, dirigiendo su trayectoria a lo largo de geodésicas, ni sobre la forma en que el propio espacio-tiempo se ve influido por la presencia de materia y se arrastra hacia una nueva configuración.

Por otro lado, decir que la gravedad es equivalente al fenómeno del «espacio-tiempo curvo» no es lo mismo que decir que la gravedad no existe como interacción, aunque tampoco descarta esta posibilidad. RG es compatible con escenarios en los que no existe una interacción gravitatoria responsable del intercambio de momento. Los fenómenos gravitacionales podrían ser solo un subproducto del hecho de que ciertas configuraciones físicas son compatibles con estar siendo acelerado según algún marco de referencia, o con descripciones realizadas desde marcos de referencia acelerados. No hay ni una sola palabra en el principio de equivalencia sobre los detalles de la interacción gravitacional (si es que existe), por el contrario, lo que sí dice el principio de equivalencia es que no hay ningún experimento que pueda realizarse para determinar si estamos bajo la presencia de un campo gravitacional o si el marco de referencia

¹⁴ Esta misma idea aparece también en libros de texto, aunque quizás con menos frecuencia, véase Carroll (2014, p.178). Desde otra perspectiva al respecto, Mukohyama y Uzan (2013) sostienen que la estructura lorentziana es una propiedad efectiva que surge debido a la propagación de los campos en una métrica efectiva.

que estamos utilizando para describir la física que nos rodea está acelerando.

Un mundo sin fuerzas gravitacionales, es decir, un mundo sin interacción gravitacional entre (al menos) dos objetos físicos, es quizás la interpretación más directa de RG, dado su carácter estructural. Si la gravedad no existiera como fuerza, aparecería inevitablemente un «campo gravitatorio» ficticio, independientemente de los fenómenos físicos en cuestión, debido a la covarianza de las leyes físicas, el principio de equivalencia y la forma de las ecuaciones de Einstein.

Profundicemos en esta última idea: sin duda es posible que existan entornos físicos en los que no intervengan quarks ni gluones y por lo tanto tampoco cargas de color, por ejemplo, en un gas de electrones. En principio, dicho sistema podría describirse en detalle sin recurrir a las fuerzas nucleares fuertes; sin embargo, dicho gas no puede describirse en detalle sin tener en cuenta las ecuaciones de campo de Einstein, ya que el gas de electrones tendría un tensor de energía-momento asociado. El mismo argumento se repite para cualquier entorno físico posible, es inevitable, por lo tanto, la gravedad podría interpretarse no como una fuerza adicional, sino simplemente como una pseudo fuerza que aparece inevitablemente debido a la descripción más general que se puede hacer de cualquier fenómeno físico.

Supongamos, a efectos del argumento, que las interacciones gravitacionales existen (en el sentido de la sección 2.1). Hay muchas posibilidades para dicha interacción, pero dos de ellas son actualmente bastante populares: por un lado, la gravedad podría estar mediada por gravitones como responsables del intercambio de momento entre objetos físicos. Por otro lado, el espacio-tiempo como sustancia podría ser responsable de los fenómenos gravitacionales a través de una interacción desconocida que comunica su curvatura a los objetos físicos, y los obliga a seguir geodésicas.

Ciertamente, estas no son las únicas alternativas, la naturaleza estructural de RG no nos informa sobre el tipo de interacciones sobre las que imponen restricciones, sino solo sobre las restricciones estructurales que imponen. El propio Einstein tomó distancia inicialmente de interpretaciones de RG que la entendían como una «geometrización de la gravedad», y rechazó una interpretación cinemática o dinámica de RG. Lo que Einstein sí destacó de RG es la unificación del concepto de inercia y el de gravedad, en analogía con la unificación de los campos eléctrico y magnético en la relatividad especial (Lehmkuhl, 2014). El punto de vista de Einstein no contradice otras interpretaciones, todas ellas compatibles con el carácter estructural de RG. Como se acaba de mencionar, RG es compatible con fluidos (de polvo, radiación, energía del vacío), con el electromagnetismo y con la interacción descrita por el Modelo Estándar de la Física de Partículas (lo que no es lo mismo a decir que la métrica en sí misma es un campo cuantizable). RG también es compatible con la existencia de la gravedad como interacción entre objetos físicos, o con la gravedad como interacción entre el espacio-tiempo y los objetos físicos, o con escenarios en los que no existe ninguna interacción gravitatoria (en el sentido de la sección 2.1).

5. Revisión del poder de la distinción

En las dos secciones anteriores se ha argumentado que RG es una teoría estructural; en esta sección intentamos mostrar que las inesperadas consecuencias que ello conlleva son coherentes con nuestro conocimiento actual de RG. La interpretación estándar de los resultados de Einstein

considera a la fuerza de la gravedad como una fuerza ficticia, un producto de la curvatura del espacio-tiempo y la inercia (la tendencia natural de los cuerpos a seguir geodésicas) en lugar de una interacción real, en el sentido argumentado en 2.1. Los libros de texto son bastante categóricos en esta materia, tomemos por ejemplo a Øyvind y Hervik:

«La visión de Einstein, basada en la igualdad de las masas iniciales y gravitacionales, es que no existe ninguna fuerza gravitacional. Lo que en la teoría newtoniana se denomina «movimiento de partículas bajo la influencia de la fuerza gravitacional», según la teoría general de la relatividad es un movimiento libre a lo largo de curvas geodésicas en un espacio-tiempo curvo». "(Øyvind and Hervik, 2007, p.179, traducción propia)

o Schutz

«Una vez que reconocemos que el espacio-tiempo tiene curvas naturales, las geodésicas, y que cuando caemos sobre ellas estamos en caída libre y no sentimos la gravedad, entonces podemos descartar por completo el concepto newtoniano de fuerza gravitatoria. Solo estamos siguiendo la curva natural del espacio-tiempo». (Schutz, 2009, p.173, traducción propia)

Esta interpretación estándar es coherente con el carácter estructural de RG.

Sigue siendo una cuestión abierta si RG implica que la gravedad se reduce a la geometría como una distorsión del espacio-tiempo; si la geometría se reduce a la gravedad y la primera es una manifestación de la segunda, o si la gravedad y la geometría pueden considerarse como lo mismo (Lehmkuhl, 2008). Incluso si se acepta la imagen habitual y la gravedad es una fuerza ficticia que corresponde «solo» al movimiento inercial en un espacio curvo, sigue sin estar claro cómo o en qué sentido el espacio-tiempo se comunica o interactúa con otros objetos físicos dirigiendo sus trayectorias. Se desconoce el mecanismo causal de tal comportamiento, del mismo modo que en la mecánica clásica hay que postular que los objetos no perturbados se mueven en línea recta, o como en la mecánica hamiltoniana o lagrangiana hay que postular que las soluciones físicas corresponden al extremo de una familia de funciones, o como en la mecánica cuántica hay que postular que las probabilidades están relacionadas con el cuadrado de una función de onda. Esto no es un fallo de estas teorías, sino más bien un resultado esperado dado su carácter estructural: son incapaces de proporcionar información sobre el mecanismo causal que subyace a cualquier fenómeno, aunque pueden proporcionar restricciones estructurales. La derivación del principio geodésico es uno de esos resultados estructurales en los que no hay mecanismos causales.

La idea inicial de derivar el principio geodésico como un teorema de las ecuaciones de Einstein, en lugar de postularlo, se ha convertido en un elemento central del debate sobre si RG puede explicar el movimiento inercial o no.

Todos los intentos de derivar el teorema implican aproximaciones de algún tipo. Uno de los enfoques más discutidos recientemente, el teorema de Geroch-Jang (véase Geroch and Jang 1975), muestra que las geodésicas temporales son las únicas curvas compatibles con tensores de energía-momento localizados arbitrariamente que satisfacen la conservación de la energía-momento y la condición de energía «reforzada» en su región vecina. La condición de energía reforzada exige una energía-momento definida positivamente y un cuadri-momento temporal. Los cuerpos de prueba no están representados por partículas puntuales estrictas.

Tenga en cuenta que el vínculo entre las partículas de prueba de materiales representados por los tensores $T_{\mu\nu}$ y el conjunto de curvas permitidas por el teorema se basa en la estructura matemática de RG. Como destaca Weatherall (2011a, 2019), las condiciones en sí mismas están relacionadas con el hecho de que las ecuaciones de movimiento requieren una estructura métrica, por lo que no proporcionan un mecanismo causal para la transferencia de momento. En el teorema no hay entidades que interactúen de ninguna manera específica ni propiedades de tales objetos. Tampoco está claro su estatus como teorema, ya que su dirección de explicación discurre de diferentes maneras relacionadas con otros principios y supuestos de la teoría.

Brown afirma que el principio geodésico demuestra que la inercia se explica mediante RG, ya que la dinámica de la teoría podría entenderse como derivada de las ecuaciones de campo de Einstein s (Brown, 2005). Sin embargo, estas afirmaciones han sido cuestionadas cuando se tiene en cuenta el trabajo de Geroch-Jang, lo que ha promovido un debate continuo. Por un lado, se ha planteado la necesidad de una condición de energía además de las ecuaciones de Einstein (y la condición de conservación) para demostrar el teorema de Geroch-Jang como un argumento en contra del poder explicativo de RG en esta materia (Malament, 2012; Weatherall, 2011b, 2017, 2019, 2011a). Por otro lado, (Sus, 2014) se alinea con Brown y defiende el poder explicativo del teorema, a pesar de las condiciones antes mencionadas, subrayando que el movimiento inercial puede derivarse independientemente de la composición material de los cuerpos o las estructuras iniciales. Tamir (2012) revisa diferentes enfoques del teorema geodésico. Algunos de ellos (generalmente referidos al trabajo de Einstein y Grommer, véase Lehmkuhl 2017; Tamir 2012) son particularmente criticados por el tratamiento de singularidades en sus formulaciones. Lehmkuhl 2017 analiza las interpretaciones que se pueden hacer del teorema bajo este enfoque, identificando los puntos móviles asociados con curvas geodésicas como «marcadores de posición» para los cuerpos de prueba, representados por soluciones similares a agujeros negros. Sin embargo, destaca que en esta formulación del teorema no hay afirmaciones sobre la existencia de partículas ni de singularidades. Tamir subraya el carácter aproximado del teorema geodésico y respalda la opinión de que es mejor concebirlo como un patrón de comportamiento general de diferentes sistemas antes que como una ley dinámica, lo que se asemeja a la naturaleza reguladora del aspecto funcional de las teorías estructurales aquí discutidas. Estos no son los únicos puntos de vista sobre el tema ni los únicos participantes en el debate, pero nuestro objetivo no es ofrecer una revisión exhaustiva del principio geodésico o los teoremas geodésicos, sino destacar que la relación entre la materia y la métrica que implican las geodésicas no se basa en entidades ni en la transferencia de momento causalmente responsable de los fenómenos. En todos los escenarios, el debate gira en torno a características estructurales.

Por definición, los cuerpos en caída libre no están sujetos a ninguna fuerza, ni siquiera a la gravedad, por lo que dentro de RG (según el teorema), no hay transferencia de energía-momento y, si eso es todo lo que hay que decir sobre la gravedad, entonces la gravedad no puede considerarse una interacción en el sentido defendido en la sección 2.1. A diferencia de los cambios de coordenadas relacionados con las transformaciones de Lorentz, dentro de RG existe un marco de referencia en el que las aceleraciones relativas pueden anularse, esto es, el marco de referencia que «cae» junto con el cuerpo. Esto permite relacionar el campo gravitatorio con una elección (arbitraria) del marco de referencia. En este contexto, la idea de «caída libre» que implica la gravedad es una elección desafortunada de palabras, ya que el teorema geodésico corresponde a trayectorias iniciales en las que no se produce ninguna transferencia de energía-momento, de forma análoga al papel teórico que desempeña la primera

ley de Newton dentro de la mecánica clásica. En palabras de Weatherall:

«En el trasfondo de la interpretación del teorema de Geroch-Jang y resultados similares se encuentra un marco más general para pensar en la influencia y la interacción entre diferentes campos de materia en una región del espacio-tiempo, donde la interacción se señala mediante el intercambio de energía-momento. Este marco para pensar en la interacción (y, a la inversa, en la no interacción) es más general que RG. .(Weatherall, 2019 traducción propia)»

El teorema geodésico proporciona una imagen clara de las relaciones estructurales de los diferentes principios que imponen regulaciones al sistema, que describen con éxito las trayectorias en presencia (o ausencia) de otras interacciones. Sin embargo, ponen de manifiesto la incompatibilidad entre RG y la idea de curvatura del espacio-tiempo como mecanismo para una explicación causal del movimiento de los cuerpos o la transferencia de momento, una explicación que consideramos un sello distintivo de cualquier posible teoría de interacción gravitatoria (en el sentido defendido en la sección 2.1).

Destacamos que RG podría ser compatible con una teoría (diferente) de interacciones gravitacionales, en la que el espacio-tiempo desempeñe el papel de agente responsable de la transferencia de momento, del mismo modo que RG es compatible con el electromagnetismo, pero RG no es la teoría que explica esa dinámica asociada a la curvatura del espacio-tiempo. Una teoría gravitatoria necesitaría algo más que relacionar la métrica y la energía-momento, ya que ambos son conceptos científicos omnipresentes. Debe describir causalmente los fenómenos y, con ello, explicar muy probablemente el principio de equivalencia de Einstein¹⁵. Afirmamos que cualquier teoría genuina de la interacción gravitatoria (con apoyo empírico) probablemente explicaría por qué los campos gravitatorios y los marcos acelerados pueden considerarse equivalentes, aunque ya no sería imposible distinguir entre ambas situaciones. Esto podría ser así por dos razones: por un lado, RG se considera una unificación de la inercia y la gravedad (véase Lehmkuhl (2014)), y las interacciones (como se defiende en la sección 2.1) implican un intercambio de momento que difiere por definición del movimiento inercial. Si alguna teoría de interacción para la gravedad superara a RG en el futuro, se esperaría que dicha teoría explique todas las pruebas empíricas que actualmente respaldan a RG (y, en este sentido, se esperaría que explique por qué los campos gravitacionales y los marcos acelerados pueden considerarse equivalentes), pero al ser una teoría mecanicista se esperaría que explique la transferencia de momento, lo que permitiría distinguir entre los fenómenos gravitacionales y los marcos de referencia acelerados. Por otro lado, en cualquier teoría mecanicista hay agentes (que realizan acciones) causalmente responsables de los fenómenos. Las interacciones son relaciones entre tales entidades materiales/físicas, por lo que, dentro de cualquier teoría mecanicista para la gravitación debería ser posible distinguir los fenómenos gravitacionales (con campos o cargas directamente responsables de los fenómenos) de las consecuencias de las descripciones relativas a marcos de referencia acelerados. Por el contrario, RG da la misma respuesta (insatisfactoria) a por qué la materia sigue la geometría que a la pregunta de cómo la materia distorsiona el

¹⁵Nos referimos aquí a lo que Lehmkuhl (2021) denomina «Principio de Equivalencia de Einstein» (EEP, por sus siglas en inglés): no es posible distinguir entre estar en presencia de un campo gravitatorio o en marcos no inerciales, y no a lo que él denominó «principio de equivalencia débil» (la equivalencia numérica entre la masa inercial y la gravitatoria) ni al «principio de equivalencia fuerte» (SEP, por sus siglas en inglés) la posibilidad de volver a obtener relatividad especial a partir de RG.

espacio-tiempo. En última instancia, la razón de esta explicación no causal es el enfoque de la propia RG, que es coherente con su naturaleza estructural.

Las teorías estructurales proporcionan información valiosa sobre el mundo físico y sus limitaciones. Por ejemplo, gracias a la relatividad especial aprendimos que las distancias y los lapsos de tiempo medidos en un marco de referencia utilizado en la descripción de algunos fenómenos serán diferentes de los medidos en otro marco de referencia, aunque las leyes de la física sigan siendo las mismas en ambos casos. También aprendimos que las partículas sin masa tienen momento y que no tiene sentido hablar de eventos simultáneos en términos absolutos. Todo esto era (y sigue siendo) muy abstracto y poco intuitivo. De la termodinámica (otra teoría estructural) aprendimos que las máquinas térmicas perfectamente eficientes son imposibles, que el cero absoluto de temperatura no se puede alcanzar en un número finito de pasos y que la energía en los sistemas cerrados se conserva. Una vez más, todo esto desafía nuestras experiencias e intuiciones cotidianas. Del mismo modo, RG también nos ha enseñado algunos resultados sorprendentes.

Algunas personas identifican las fuerzas de marea como un rasgo distintivo de los fenómenos gravitacionales genuinos, capaces de distinguirse de los marcos de referencia acelerado (o marcos de referencia inerciales en «caída libre»), ya que, en este último caso, todos los objetos mantendrían sus distancias relativas, lo que no ocurre en los fenómenos gravitacionales a gran escala. Si este fuera el caso, entonces nuestra afirmación de que RG es compatible con la posibilidad de un mundo sin gravedad como fuerza sería falsa. Sin embargo, hay que tener en cuenta que una consecuencia de RG es que los marcos de referencia planos e infinitamente extendidos no son físicos, con la única excepción de un universo perfectamente vacío (que no es el caso de nuestro universo contingente). Esto implica que las «fuerzas de marea» pueden entenderse como un subproducto de la existencia de entidades físicas (que implican necesariamente una distribución de energía y masa en el espacio), una suerte de epifenómeno análogo a las fuerzas de Coriolis, que son consecuencia de propiedades del entorno y de la inercia de los cuerpos y no de una genuina interacción en el sentido defendido en la sección 2.1. Las fuerzas de marea podrían entonces entenderse como un fenómeno inevitable que emerge de la distribución de entidades físicas más que como una prueba de existencia de un campo gravitacional, esto es, un agente que se caracteriza por tener un poder causal particular. Una visión radical de esto nos obligaría a revisar algunos queridos supuestos básicos, como que la distancia relativa entre dos objetos inalterados en reposo en un marco de referencia no cambia, aún en ese mismo marco de referencia. Después de la relatividad especial, nos acostumbramos a la idea de que la simultaneidad absoluta no es física; tal vez ahora tengamos que acostumbrarnos a la idea de que, a pesar de la covarianza y debido a ella, no todos los marcos de referencia son adecuados para las descripciones físicas (no por restricciones lógicas, sino por hechos contingentes). En este sentido, podría seguir siendo el caso de que la relatividad general sea más una teoría del movimiento inercial y sus descripciones que una teoría de interacciones gravitacionales.

De RG se pueden extraer otras lecciones «inesperadas», por ejemplo, que la conservación de la energía o del momento no son características universales de la naturaleza, sino más bien casos especiales que dependen de la posibilidad de describir situaciones físicas de una manera particular, es decir, teniendo una métrica independiente de cierta coordenada x^β para un β dado, véase (Schutz, 2009, p.178-180) para más detalles. En este sentido, RG parece ser una estructura más amplia que la termodinámica, ya que la primera ley solo sería válida en un subconjunto de marcos de referencia, precisamente aquellos que son seleccionados naturalmente

por los laboratorios en la Tierra. Esta y otras lecciones importantes de RG no se analizan aquí en detalle.

Así pues, el carácter estructural de RG nos deja grandes resultados, pero también cuestiones abiertas. Entre ellas, si la gravedad corresponde a una interacción genuina entre objetos físicos, o si más bien corresponde a un subproducto inevitable (y sorprendente) de un universo en el que las leyes de la física son covariantes¹⁶. Esta pregunta podría encontrar respuesta en los próximos años, gracias a nuevos experimentos que pongan a prueba viejas ideas. Sin embargo, cabe señalar que un resultado positivo de esos experimentos podría acabar en abierta tensión con RG.

6. RG, una estructura para toda interacción posible (menos para la gravedad)

Es bien sabido que en física se siguen considerando a la gravedad como una fuerza fundamental de la naturaleza (junto con el electromagnetismo y las fuerzas nucleares débil y fuerte), independientemente de la interpretación estándar mencionada anteriormente. Los «gravitones» son hipotéticas partículas de espín 2 responsables de transmitir las interacciones gravitacionales. Cabe señalar que, si la gravedad es una fuerza en el sentido aquí utilizado, entonces RG no es la teoría que la describe, en particular, si dicha fuerza es equivalente a las otras tres fuerzas fundamentales y el intercambio de momento está mediado por un bosón que puede identificarse con la excitación cuantizada de un campo, dicho campo no puede ser el campo métrico, ya que RG no es una teoría renormalizable. Más concretamente, cualquier evidencia experimental de tal mediador no solo requeriría de una teoría diferente a RG que describa las interacciones gravitacionales, sino que también constituiría una violación explícita del principio de equivalencia, al menos a algunas versiones del mismo¹⁷. Citamos nuevamente libros de texto comúnmente usados en la formación de físicos:

«La teoría de Einstein, por supuesto, no es una teoría cuántica, y actualmente se están realizando grandes esfuerzos teóricos para formular una teoría de gravedad cuántica coherente. Esperamos que, en algún nivel de precisión experimental, haya

¹⁶ La afirmación «un universo en el que las leyes de la física son covariantes» parece a primera vista una declaración con gran carga física, sin embargo, como dice Carroll, «es más o menos carente de contenido». «Idots siempre es posible redactar leyes de forma independiente de las coordenadas, si las leyes están bien definidas desde el principio. Un sistema físico que actúa de una determinada manera no sabe qué sistema de coordenadas se está utilizando para describirlo; por lo tanto, cualquier cosa que merezca el nombre de «ley de la física» (en contraposición a alguna afirmación concreta de esa ley) debe ser independiente de las coordenadas. Insistir en la independencia explícita de las coordenadas no dice nada sobre la adaptación de las leyes al espacio-tiempo curvo; como hemos visto, las ecuaciones tensoriales manifiestas adoptan la misma forma independientemente de la geometría. [

Idots] hacer que las cosas sean «tensoriales» o «covariantes» es una simple cuestión de necesidad lógica, no un principio físico que se pueda refutar mediante experimentos» (Carroll, 2014, p.178, traducción propia)

^{17**} Las diferentes versiones y el papel del principio de equivalencia han sido discutidos por Lehmkuhl 2021, quien concluyó que el principio de equivalencia desempeñó más bien un papel heurístico durante la construcción de RG (una especie de puente entre teorías), sin ser estrictamente necesario para su desarrollo. Si no fuera así, es decir, si el principio de equivalencia desempeñara un papel necesario dentro de RG, el título de esta sección habría sido literal, y no solo una afirmación provocativa destinada a llamar la atención del lector.

correcciones cuánticas medibles a la teoría, que podrían, por ejemplo, presentarse en forma de campos adicionales acoplados a la métrica. La fuente de dicho campo podría violar el principio de equivalencia de Einstein. El campo en sí mismo podría transportar una forma adicional de ondas gravitacionales. En principio, cualquiera de las predicciones de RG podría violarse en alguna de estas teorías». "(Schutz, 2009, p.186, traducción propia)

Huelga decir, a la fecha no se ha violado ninguna predicción de RG.

La búsqueda experimental de una partícula que medie las interacciones gravitacionales se remonta, al menos, a Richard Feynman, quien dudaba de la explicación estándar de los fenómenos gravitacionales en términos de un espacio-tiempo curvo como una sustancia que obliga a los objetos materiales a seguir geodésicas, en su opinión «... el hecho de que un campo sin masa de espín 2 pueda interpretarse como una métrica es simplemente una «coincidencia» que «podría entenderse como representativa de algún tipo de invariancia de gauge». (Feynman et al., 1995, p. 113, traducción propia) y desarrolló en su lugar una teoría cuántica de campos para las interacciones gravitacionales como ejercicio pedagógico.

«¿Qué se gana al plantear el problema de esta manera? Obviamente, se pierde la belleza de la geometría, pero eso no es lo principal. Lo principal es que se tiene un nuevo campo y se hace todo lo posible por conseguir un campo de espín dos lo más coherente posible. Creo que la cuantización seguiría la misma dirección que la solución original del problema. Se consideraría simplemente como otro campo más a ser cuantizado. Desde otro punto de vista, la geometría es importante, pero desde este punto de vista, la gravedad es solo otro campo» "(Feynman en DeWitt y Rickles 2011, p.275, traducción propia).

Utilizando la terminología de nuestro debate, Feynman construyó una teoría mecanicista para la gravedad, una teoría en un espacio-tiempo plano de Minkowski como fondo, que es diferente de la teoría estructural de RG, aunque empíricamente equivalente en lo que respecta a los fenómenos gravitacionales (y solo a los fenómenos gravitacionales). La característica covariante de la teoría de Feynman no puede extrapolarse a ningún otro fenómeno físico como lo hace RG, del mismo modo que la invariancia bajo el grupo de Poincaré en la teoría del éter de Lorentz no puede extrapolarse a otros fenómenos, a diferencia de como lo hace RG. Según la teoría de la gravedad de Feynman, la covarianza de todas las leyes físicas es «simplemente un hecho bruto» ¹⁸.

Para demostrar la naturaleza cuántica de la gravedad, Feynman propuso un experimento mental que consistía en preparar una masa en una superposición cuántica de dos posiciones diferentes bajo la influencia de un campo gravitatorio y observar la naturaleza cuántica del campo gravitatorio mediante evidencias de interferencia, en un experimento similar a un interferómetro.

¹⁸Esto nos lleva al debate Brown-Janssen (véanse las referencias en la nota al pie 1). Por supuesto, la teoría de Feynman no es renormalizable y, por lo tanto, tiene «problemas» en sus propios términos, problemas que impedirían a Feynman considerarla como algo más que un ejercicio pedagógico. A pesar de ello, la idea principal que motivó los esfuerzos de Feynman en la construcción de una alternativa que se opone a la interpretación geométrica de RG se alinea con la defensa de Brown de la teoría del éter de Lorentz, en contraposición al llamado enfoque «cinemático» de RE, defendido por Janssen.

«Si las masas se entrelazan, según el razonamiento de Feynman, la gravedad sería cuántica, ya que al re-combinar las dos ramas espaciales invertiría el acoplamiento con la gravedad, confirmando la dinámica unitaria de la teoría cuántica» "(Marletto and Vedral, 2017, traducción propia).

Marletto identifica algunos problemas en el razonamiento de Feynman, en particular destaca que un experimento realizado con una sola masa de prueba no proporcionaría pruebas suficientes de la naturaleza cuántica del campo gravitatorio, ya que la interacción con los campos clásicos también podría dar resultados similares.

Es interesante destacar que la gravedad newtoniana clásica, como interacción dentro del marco de la mecánica cuántica, ya se ha probado en la interferometría de neutrones, en los denominados "experimentos COW" (Overhauser and Colella, 1974; Colella et al., 1975) y se ha demostrado su acuerdo explícito con el principio de equivalencia en relatividad general (Bonse and Wroblewski, 1983).

Sin embargo, el caso de Marletto es diferente, ya que propone repetir el experimento mental de Feynman pero utilizando dos masas en lugar de una, cada una de ellas en una superposición cuántica de dos posiciones diferentes, y esperar a que el campo gravitatorio las entrelace

«... si la gravedad puede generar entrelazamiento entre las dos masas, entonces la gravedad debe ser cuántica. Por «ser cuántico» nos referiremos en lo sucesivo a que, para describirlo, se necesitan al menos dos variables que no comutan entre sí. Se trata de una prueba indirecta, ya que las características cuánticas del campo se detectan midiendo solo los observables de dos masas de prueba (en lugar de, por ejemplo, detectar gravitones o fluctuaciones del espacio-tiempo) (Marletto y Vedral, 2018, traducción propia).

En otras palabras, un resultado positivo equivale a una prueba de la naturaleza cuántica del campo gravitatorio. Tal y como se defiende en Christodoulou et al. 2022, el entrelazamiento mediado por la gravedad difiere de los intentos experimentales anteriores para observar efectos cuánticos y gravitatorios:

... Sin embargo, ninguno de estos experimentos [es decir, los experimentos COW, el rebote de neutrones y las fuentes atómicas] implica propiedades cuánticas reales de la geometría en sí misma. Todos ellos son compatibles con un mundo en el que la materia cuántica se mueve en una geometría clásica descrita por la relatividad general clásica...

Si existe entrelazamiento cuántico entre entidades implica que las interacciones que vinculan a ambos agentes están mediadas por entidades que pueden describirse con al menos dos variables que no comutan. Evidencia de estados entrelazados equivale a evidencia de la naturaleza cuántica del mediador. Esto es realmente central en nuestra discusión, pues resultados positivos de este experimento equivalen a evidencia de la existencia de un mediador para las fuerzas gravitacionales, implicaría que la gravedad es un fenómeno irreducible a la elección de marcos de referencia, discriminando si la gravedad es una interacción genuina o no. La relevancia del entrelazamiento va más allá de aportar evidencia de la naturaleza cuántica de la gravedad, permite afirmar que la gravedad, como interacción, genuinamente existe.

Todo marco de referencia, ya sea inercial o no, es una elección relacionada a la descripción de eventos, es algo abstracto, no puede tener consecuencias físicas, por ello de existir evidencia de entrelazamiento cuántico en ausencia de toda fuerza salvo gravedad, equivaldría a tener evidencia de una violación del principio de equivalencia (en su versión que asegura que no hay experimento posible que permita distinguir entre estar en presencia de un campo gravitacional o estar en un marco de referencia acelerado), porque habría fenómenos gravitatorios que no podrían reproducirse en todos sus detalles con marcos no inerciales¹⁹.

Obsérvese que la existencia del agente mediador (en contraposición a un fenómeno que depende del marco de referencia) es obligatoria, ya que para que los experimentos tengan éxito, el mediador debe tener al menos dos variables que no comutan (una entidad inexistente no puede tener propiedades), observar el entrelazamiento entre las dos masas sería suficiente para demostrar que el campo gravitatorio como mediador es una entidad cuántica dinámica (Bose et al., 2017; Marletto and Vedral, 2017; Christodoulou and Rovelli, 2019; Marshman et al., 2019; Krisnanda et al., 2020).

Nos interesa destacar que el objetivo de estos experimentos no está inspirado en el tipo de dudas que emergen de la naturaleza estructural de RG, es decir, los experimentos no están diseñados para distinguir entre marcos de referencia acelerados (lo que implica una decisión sobre las descripciones, una elección arbitraria y no física) e interacciones físicas, sino que asumen como punto de partida la existencia de la interacción, e intentan medir algunas características del portador o mediador en ella, concretamente su naturaleza cuántica.

La mecánica cuántica es también una teoría estructural, por lo que impone restricciones a las interacciones y entidades que enmarca. Por lo tanto, si la teoría mecanicista utilizada en el marco de la mecánica cuántica para probar la naturaleza cuántica del campo gravitatorio es el campo newtoniano clásico (como en el caso de Marletto), entonces, incluso si estos experimentos arrojan resultados positivos, no podrían identificar si la entidad responsable de las interacciones gravitatorias son los gravitones, la curvatura del espacio-tiempo en sí misma o cualquier otra posibilidad, ya que esta información no está codificada en la teoría mecanicista utilizada.

Esa es otra conclusión importante que se puede obtener a priori de sólo conocer la naturaleza estructural (o mecanicista, si fuese el caso) de las teorías en cuestión. En este caso, ya sabiendo que la mecánica cuántica es una teoría estructural, así como lo es la gravedad, el mezclar ambas estructuras no puede entregarnos información detallada de la naturaleza causal subyacente, no pude informarnos del tipo de agente involucrado ni de la naturaleza de la interacción. Este mismo argumento fue empleado por uno de nosotros para argumentar sobre la naturaleza estructural de la mecánica cuántica de campos, con lo que es posible argumentar que esta teoría por si sola no es suficiente para argumentar en favor de la fundamentalidad de los campos por sobre partículas, ver Romero-Maltrana, Benítez and Soto (2018).

No obstante, resultados positivos de experimentos como el de Marletto traen consigo una gran lección, ya que son una violación explícita al principio de equivalencia de Einstein, en el

¹⁹En contra de estas intuiciones, Marletto y Vedral (2021) diseñaron un experimento con una sola partícula que se entrelaza consigo misma mediante un marco acelerado. Sin embargo, la propuesta asume que la métrica no es clásica y que puede crear entrelazamiento, es decir, asumen el sustancialismo del espacio-tiempo y, además, asumen que dicha entidad no es clásica. Ambas suposiciones van más allá del formalismo puro de RG. Además, la propuesta también toma la EEP como premisa y la impone para conectar los marcos de referencia acelerados y los campos gravitacionales responsables del entrelazamiento (una estrategia estructural).

sentido de que el campo gravitatorio y los marcos no inerciales ya no serían indistinguibles.

En cierto sentido, el experimento de Marletto es análogo al de Michelson y Morley, ya que ambos experimentos están diseñados para medir una propiedad de una entidad que se supone que existe. Aún está por ver si, como en el famoso caso de Michelson y Morley, un resultado negativo acaba enterrando la fuerza de la gravedad, como en su momento se enterró el éter²⁰.

7. Conclusiones

El objetivo de este artículo es mostrar la utilidad de la distinción entre teorías estructurales y teorías mecanicistas mediante el análisis de RG como caso de estudio. La conclusión principal es que es posible conocer a priori, sin un análisis detallado de cuestiones técnicas, la importancia ontológica, funcional y epistémica de las teorías si ellas se clasifican correctamente. RG es una teoría difícil de clasificar pues, aunque es una teoría estructural, es comúnmente considerada la mejor teoría de gravedad disponible, y la gravedad es comúnmente considerada como una fuerza (una interacción). Aquí analizamos por qué el hecho de que RG sea una teoría estructural y, al mismo tiempo, la mejor teoría sobre gravitación, no es una contradicción como parece.

Una visión substantivalista del espacio-tiempo subyace a la noción popular de la curvatura del espacio-tiempo como responsable causal de los fenómenos gravitacionales. Los gravitones (una partícula intercambiada entre objetos físicos responsable de los cambios de momento) también es considerada causalmente responsable de la gravedad. Cabe señalar que la coexistencia de ambos mecanismos resultaría redundante, y es poco probable que ambos se den en la naturaleza. No obstante, ambas imágenes parecen estar presentes en la mente de muchos físicos. Todo ello es coherente con el carácter marco de RG, ya que, como tal, no se requieren necesariamente gravitones (agentes que realizan interacciones) para su formulación, tampoco se requiere una visión substantivalista del espacio-tiempo.

Mostramos que la distinción entre teorías puede ser de mucha ayuda a la hora de interpretarlas. A modo de ejercicio, en la sección 3 predijimos las características epistémicas, ontológicas y funcionales que una teoría como RG proporcionaría en caso de que correspondiera a una teoría mecanicista o a una teoría estructural. El resto del texto muestra que tales predicciones son coherentes con el formalismo de RG, y con la forma en que los físicos abordan sus investigaciones en este campo.

Concluimos que, como teoría estructural, es posible responder a un importante número de preguntas con RG, mientras que otras permanecerán sin respuesta. A pesar de la fama de RG como teoría de la gravedad, la relación entre el espacio-tiempo y gravedad no es clara,

²⁰Estas conclusiones están limitadas por las teorías físicas actuales, es decir, aceptando el estado de desarrollo alcanzado hasta la fecha por las estructuras de la mecánica cuántica (MC) y relatividad general. Se sabe que MC no es una teoría final, incluso existen cuestionamientos sobre la fundamentalidad de RG, por lo que podría darse el caso de que lo que parece una interacción a esta escala (si se obtiene un resultado positivo del experimento) corresponda a una característica inevitable de un marco más fundamental que combine RG y MC, al igual que la gravitación universal Newtoniana se disuelve en RG. Por lo tanto, nuestro desconocimiento sobre teorías futuras debería impedirnos sacar ninguna conclusión. Sin embargo, este tipo de razonamiento impediría cualquier tipo de argumento en cualquier ámbito posible, un precio demasiado alto a pagar (y una situación demasiado aburrida de soportar). Todas nuestras conclusiones deberían incluir la frase «teniendo en cuenta el estado actual de las teorías científicas», pero hemos decidido ahorrar ese sufrimiento a los lectores.

se desconoce si simplemente la descripción de la trayectoria de cuerpos materiales es afín con geodésicas en espacios curvos, o si genuinamente la materia sigue geodésicas porque el espacio-tiempo existe como substancia e impone de alguna manera tal restricción a los objetos físicos, y si es así, no es claro cómo se lleva a cabo causalmente dicha interacción. Tampoco es claro si, en vez de lo anterior, la masa/energía desempeña el papel de «carga gravitacional», similar a otras cargas en teorías de Gauge, permitiendo la interacción entre objetos a través del intercambio de bosones (gravitones). Si fuese este el caso, aún no es claro qué realidad física, si la hay, es capturada por la descripción en términos de geodésicas en el espacio-tiempo curvo. Estas dudas son esperables debido al carácter estructural de RG. Por muy poderosa que sea esta teoría, simplemente no puede proporcionar información sobre interacciones específicas, entidades/sustancias que interactúan o mecanismos causales responsables de fenómenos concretos.

RG es un amplio marco para todo tipo de teorías, tanto para otras teorías estructurales como RE, la termodinámica y la mecánica newtoniana, como para todo tipo de teorías mecanicistas, desde los fluidos de polvo o radiación hasta las fuerzas fundamentales codificadas en el Modelo Estándar de la física de partículas. El principio de equivalencia hace que este marco general sea también capaz de abarcar todos los fenómenos gravitacionales conocidos, lo que implica que RG es un buen marco para una teoría de interacciones gravitacionales aún por descubrir. Otra posibilidad es considerar a los fenómenos gravitacionales son las consecuencias inevitables de la inercia en un universo donde las leyes de la física son covariantes y, por lo tanto, no corresponden a una fuerza genuina en el sentido defendido en la sección 2.1.

Hemos insistido en cuestionar el estatus de la gravedad como fuerza relacionada con la sección 2.1, es decir, considerando las fuerzas como interacciones entre (al menos) dos cuerpos materiales que dan lugar a un intercambio de momento entre los participantes. Quizás muchos preferirían abandonar tal noción de fuerza y relajarla para incluir los fenómenos gravitacionales, incluso cuando se puede argumentar que son una consecuencia de la inercia. Al hacerlo, no solo se difumina la distinción entre fuerzas y pseudofuerzas, como la fuerza de Coriolis, sino que se descarta una idea central de la física con profundas consecuencias metafísicas, lo que nos parece de suma importancia.

Si la gravedad es una fuerza, tal y como se defiende en la sección 2.1, la búsqueda de teorías mecanicistas está justificada. Sin embargo, cabe señalar que, en tal caso, RG es tanto una teoría de la gravedad como una teoría del electromagnetismo, o de las interacciones fuertes, ya que desempeña la misma función reguladora para todas las interacciones posibles en física (y no solo para la gravedad). Sin embargo, si la gravedad no es una fuerza, sino más bien una consecuencia inevitable de la inercia y la covarianza de las leyes físicas, entonces explorar o comprender RG se convierte en la única forma (por construcción) de describir un pseudofenómeno que identificamos con gravedad, pero que no es más que movimientos iniciales. Un fondo omnipresente y una base necesaria para todas las posibles interacciones físicas. En este último caso, no tiene sentido postular la existencia de gravitones, e incluso la necesidad de postular la existencia del espacio-tiempo como entidad física capaz de interactuar con objetos materiales se vuelve cuestionable.

La última parte de este trabajo analiza nuevos esfuerzos experimentales que podrían aportar pruebas a favor de una de estas dos posibilidades, que entendemos como mutuamente excluyentes dado que sobredeterminan los fenómenos gravitatorios. Esos experimentos respaldan nuestra tesis sobre la naturaleza estructural de RG. Al presuponer que la gravedad es una genuina interacción dan por sentado lo que aquí cuestionamos, por lo que cualquier resultado

positivo violaría explícitamente el principio de equivalencia y, por lo tanto, entra en tensión con RG. Tales experimentos no solo proporcionarían posibles pruebas de la naturaleza cuántica de la gravedad, sino que también darían una respuesta definitiva a las dudas que levantamos en este ensayo, a saber, la pregunta de si la gravedad es una interacción física real en la naturaleza.

El objetivo de este proyecto es doble: en primer lugar, utilizar la distinción como guía para el análisis ontológico, epistémico y funcional de RG y, una vez que este análisis ha demostrado ser (como creemos) fructífero en un escenario complejo, aprovechar dicho éxito para promover el uso de la distinción en el análisis científico y filosófico. La ciencia está construida por personas, pero está hecha de teorías, y estas teorías tienen características epistémicas, ontológicas y funcionales nada triviales, con importantes consecuencias interpretativas. La distinción no solo muestra que dichas características están interconectadas entre sí, sino que también permite anticipar o restringir el posible contenido ontológico, el tipo de explicación y el papel funcional de las teorías científicas, aún antes de cualquier análisis técnico detallado. Destacar este punto es, con mucho, la contribución más importante de este artículo.

Agradecimientos

Este artículo es una mejora, traducida al español, del artículo “The heuristic power of theory classification, the case of general relativity”. Publicado en *Foundations of Physics*, 52(4), 94, el año 2022. Agradecemos a los editores de esta revista por darnos la posibilidad de llevarlo a público hispanoparlante. También queremos agradecer a Federico Benítez, Carlos Rubio y Radouane Gannouji por leer versiones anteriores de este manuscrito y por sus comentarios y opiniones, que han sido de enormemente ayuda.

Financiamiento

Este trabajo ha sido financiado por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, subvención n.º 039.374/2021.

Referencias

- Acuña, P. (2016). Minkowski spacetime and lorentz invariance: The cart and the horse or two sides of a single coin? *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 55:1–12.
- Adler, S. L. (2003). Why decoherence has not solved the measurement problem: a response to pw anderson. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 34(1):135– 142.
- Aronson, J. L. (1971). On the grammar of cause. *Synthese*, 22(3-4):414–430.
- Bacciagaluppi, G. (2020). The Role of Decoherence in Quantum Mechanics. In Zalta, E. N., editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Fall 2020 edition.

- Balashov, Y. and Janssen, M. (2003). Presentism and relativity. *The British journal for the philosophy of science*, 54(2):327–346.
- Belot, G. (1998). Understanding electromagnetism. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49(4):531–555.
- Benítez, F. (2019). Selective realism and the framework/interaction distinction: A taxonomy of fundamental physical theories. *Foundations of Physics*, 49(7):700–716.
- Blanchard, P., Giulini, D., Joos, E., Kiefer, C., and Stamatescu, I.-O. (2000). Decoherence: Theoretical, experimental, and conceptual problems: Proceedings of a workshop held at bielefeld germany, 10–14 november 1998.
- Bonse, U. and Wroblewski, T. (1983). Measurement of neutron quantum interference in noninertial frames. *Physical Review Letters*, 51(16):1401.
- Bose, S., Mazumdar, A., Morley, G. W., Ulbricht, H., Toros, M., Paternostro, M., Geraci, A. A., Barker, P. F., Kim, M., and Milburn, G. (2017). Spin entanglement witness for quantum gravity. *Physical review letters*, 119(24):240401.
- Brown, H. R. (2005). *Physical Relativity: Space-Time Structure From a Dynamical Perspective*. Oxford University Press UK.
- Brown, H. R. and Holland, P. (2004). Dynamical versus variational symmetries: understanding noether's first theorem. *Molecular Physics*, Vol. 102, No. 11-12, 1133-1139 (2004).
- Brown, H. R. and Pooley, O. (2001). The origin of the spacetime metric: Bells lorentzian pedagogyand its significance in general relativity. *Physics meets philosophy at the Planck scale*, pages 256–272.
- Brown, H. R. and Pooley, O. (2006). Minkowski space-time: a glorious nonentity. *Philosophy and Foundations of Physics*, 1:67–89.
- Brown, H. R. and Timpson, C. G. (2006). Why special relativity should not be a template for a fundamental reformulation of quantum mechanics. *In Physical theory and its interpretation*, pages 29–42. Springer.
- Brown, H. R. and Uffink, J. (2001). The origins of time-asymmetry in thermodynamics: The minus first law. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 32(4):525–538.
- Bub, J. (2000). Quantum mechanics as a principle theory. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31(1):75–94.
- Bub, J. (2005). Quantum mechanics is about quantum information. *Foundations of Physics*, 35(4):541–560.
- Bub, J. and Demopoulos, W. (1974). The interpretation of quantum mechanics. *In Logical and Epistemological Studies in Contemporary Physics*, pages 92–122. Springer.
- Camp, W. V. (2011). On kinematic versus dynamic approaches to special relativity. *Philosophy of Science*, 78(5):1097–1107.
- Carroll, S. (2014). *Spacetime and Geometry*: Pearson New International Edition. Pearson Education Limited.

- Christodoulou, M., Di Biagio, A., Howl, R., and Rovelli, C. (2022). Gravity entanglement, quantum reference systems, degrees of freedom. *arXiv eprints*, page arXiv:2207.03138.
- Christodoulou, M. and Rovelli, C. (2019). On the possibility of laboratory evidence for quantum superposition of geometries. *Physics Letters B*, 792:64–68.
- Clifton, R., Bub, J., and Halvorson, H. (2003). Characterizing quantum theory in terms of information-theoretic constraints. *Foundations of Physics*, 33(11):1561–1591.
- Colella, R., Overhauser, A. W., and Werner, S. A. (1975). Observation of gravitationally induced quantum interference. *Physical Review Letters*, 34(23):1472.
- DeWitt, C. M. and Rickles, D. (2011). *The role of gravitation in physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference*, volume 5. epubli.
- DiSalle, R. (2006). *Understanding space-time: The philosophical development of physics from Newton to Einstein*. Cambridge University Press.
- Dowe, P. (2000). *Physical Causation. Cambridge Studies in Probability, Induction and Decision Theory*. Cambridge University Press.
- Earman, J. and Norton, J. (1987). What price spacetime substantivalism? The hole story. *The British journal for the philosophy of science*, 38(4):515–525.
- Einstein, A. (1919). What is the theory of relativity? *Ideas and Opinions* (1982), pages 227–32.
- Fair, D. (1979). Causation and the flow of energy. *Erkenntnis*, 14(3):219–250.
- Felline, L. (2011). Scientific explanation between principle and constructive theories. *Philosophy of Science*, 78(5):989–1000.
- Felline, L. (2018). Quantum theory is not only about information. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*.
- Feynman, R. P., Morinigo, F. B., and Wagner, W. G. (1995). Feynman lectures on gravitation. Reading, MA: Addison-Wesley,— c1995, edited by Hatfield, Brian.
- Flores, F. (1999). Einstein's theory of theories and types of theoretical explanation. *International Studies in the Philosophy of Science*, 13(2):123–134.
- Frisch, M. (2011). Principle or constructive relativity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42(3):176–183.
- Geroch, R. and Jang, P. S. (1975). Motion of a body in general relativity. *Journal of Mathematical Physics*, 16(1):65–67.
- Goenner, H. F. (1984). Theories of gravitation with nonminimal coupling of matter and the gravitational field. *Foundations of physics*, 14(9):865–881.
- Healey, R. (1997). Nonlocality and the aharonov-bohm effect. *Philosophy of Science*, 64(1):18–41.
- Hoefer, C. (1996). The metaphysics of space-time substantivalism. *The Journal of Philosophy*, 93(1):5–27.
- Hojman, S. A. (1992). A new conservation law constructed without using either lagrangians or hamiltonians. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 25(7):L291.

- Krisnanda, T., Tham, G. Y., Paternostro, M., and Paterek, T. (2020). Observable quantum entanglement due to gravity. *npj Quantum Information*, 6(1):1–6.
- Lange, M. (2007). Laws and meta-laws of nature: Conservation laws and symmetries. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38(3):457 – 481.
- Lange, M. (2011). Conservation laws in scientific explanations: Constraints or coincidences? *Philosophy of Science*, 78(3):333–352.
- Lange, M. (2014). Did einstein really believe that principle theories are explanatorily powerless? *Perspectives on Science*, 22(4):449–463.
- Lavis, D. A. (2005). Boltzmann and gibbs: An attempted reconciliation. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 36(2):245–273.
- Lehmkuhl, D. (2008). Is spacetime a gravitational field? *Philosophy and Foundations of Physics*, 4:83–110.
- Lehmkuhl, D. (2014). Why einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46:316–326.
- Lehmkuhl, D. (2017). Literal versus careful interpretations of scientific theories: The vacuum approach to the problem of motion in general relativity. *Philosophy of Science*, 84(5):1202–1214.
- Lehmkuhl, D. (2021). The equivalence principle (s). In *The Routledge Companion to Philosophy of Physics*, pages 125–144. Routledge.
- Macdonald, A. (2001). Einsteins hole argument. *American Journal of Physics*, 69(2):223–225.
- Malament, D. B. (2012). A remark about the geodesic principle in general relativity. In *Analysis and Interpretation in the Exact Sciences*, pages 245–252. Springer.
- Maltrana, D., Herrera, M., & Benitez, F. (2022). Einstein's theory of theories and mechanicism. *International Studies in the Philosophy of Science*, 35(2), 153-170.
- Marletto, C. and Vedral, V. (2017). Gravitationally induced entanglement between two massive particles is sufficient evidence of quantum effects in gravity. *Physical review letters*, 119(24):240402.
- Marletto, C. and Vedral, V. (2018). When can gravity path-entangle two spatially superposed masses? *Physical Review D*, 98(4):046001.
- Marletto, C. and Vedral, V. (2021). Sagnac interferometer and the quantum nature of gravity. *Journal of Physics Communications*, 5(5):051001.
- Marshman, R. J., Mazumdar, A., and Bose, S. (2019). Locality & entanglement in table-top testing of the quantum nature of linearized gravity. *arXiv preprint arXiv:1907.01568*.
- Maudlin, T. (1998). Healey on the aharonov-bohm effect. *Philosophy of Science*, 65(2):361-368.
- Mukohyama, S. and Uzan, J.-P. (2013). From configuration to dynamics: Emergence of lorentz signature in classical field theory. *Physical Review D*, 87(6):065020.

- Norton, J. (1988). The hole argument. In *PSA: Proceedings of the biennial meeting of the Philosophy of Science Association*, volume 1988, pages 56–64. Philosophy of Science Association.
- Overhauser, A. and Colella, R. (1974). Experimental test of gravitationally induced quantum interference. *Physical Review Letters*, 33(20):1237.
- Øyvind, G. and Hervik, S. (2007). *Einstein's General Theory of Relativity: With Modern Applications in Cosmology*. Springer.
- Plotnitsky, A. (2015). A matter of principle: The principles of quantum theory, diracs equation, and quantum information. *Foundations of Physics*, 45(10):1222–1268.
- Price, H. (1996). *Time's arrow & Archimedes' point: new directions for the physics of time*. Oxford University Press, USA.
- Read, J., Brown, H. R., and Lehmkuhl, D. (2018). Two miracles of general relativity. *Studies in history and philosophy of science Part B: Studies in history and philosophy of modern physics*, 64:14–25.
- Romero-Maltrana, D. (2015). Symmetries as by-products of conserved quantities. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 52:358–368.
- Romero-Maltrana, D., Benitez, F., and Soto, C. (2018). A proposal for a coherent ontology of fundamental entities. *Foundations of Science*, 23(4):705–717.
- Ryder, L. (2006). Symmetries and conservation laws. In in Chief: JeanPierre Franoise, E., Naber, G. L., , and Tsun, T. S., editors, *Encyclopedia of Mathematical Physics*, pages 166 – 172. Academic Press, Oxford.
- Schaffner, K. F. (1969). Theories and explanations in biology. *Journal of the History of Biology*, 2(1):19–33.
- Schutz, B. (2009). *A first course in general relativity*. Cambridge university press.
- Smith, S. R. (2008). Symmetries and the explanation of conservation laws in the light of the inverse problem in lagrangian mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 39(2):325 – 345
- Smolin, L. (2017). Four principles for quantum gravity. In *Gravity and the Quantum*, pages 427–450. Springer.
- Sus, A. (2014). On the explanation of inertia. *Journal for General Philosophy of Science*, 45:293–315.
- Tamir, M. (2012). Proving the principle: Taking geodesic dynamics too seriously in einstein's theory.
- Tino, G., Cacciapuoti, L., Capozziello, S., Lambiase, G., and Sorrentino, F. (2020). Precision gravity tests and the einstein equivalence principle. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 112:103772.
- Torretti, R. (2000). *Relatividad y espaciotiempo*. RIL editores.
- Van Camp, W. (2011). Principle theories, constructive theories, and explanation in modern physics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and*

- Philosophy of Modern Physics*, 42(1):23–31.
- Van Fraasen, B. (1989). *Laws and Symmetry*. Clarendon paperbacks. Oxford University Press.
- Wald, R. M. (1984). *General relativity*(book). Chicago, University of Chicago Press, 1984, 504 p.
- Wallace, D. (2010). Decoherence and ontology: Or: How i learned to stop worrying and love fapp. *Many worlds*, pages 53–72.
- Wallace, D. and Timpson, C. G. (2010). Quantum mechanics on spacetime i: Spacetime state realism. *The British journal for the philosophy of science*, 61(4):697–727.
- Weatherall, J. (2011). On the status of the geodesic principle in newtonian and relativistic physics. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 42..
- Weatherall, J. O. (2017). Inertial motion, explanation, and the foundations of classical spacetime theories. In *Towards a theory of spacetime theories*, pages 13–42. Springer.
- Weatherall, J. O. (2019). Conservation, inertia, and spacetime geometry. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 67:144–159.
- Will, C. M. (2006). The confrontation between general relativity and experiment. *Living reviews in relativity*, 9(1):3.