Los espacio-tiempos de la relatividad general no son (tan) especiales

General-relativistic Spacetimes Are Not (so) Special

Os espaços-tempos da relatividade geral não são (tão) especiais

Álvaro Mozota Frauca
Universitat Politècnica de Catalunya, Cataluña, España.
alvaro.mozota@upc.edu
0000-0002-7715-0563

→ **Recibido:** 21 / 08 / 2025
→ **Aceptado:** 13 / 11 / 2025
→ **Publicado:** 19 / 01 / 2026

→ **Artículo de Dossier**
"Filosofía y Fundamentos de la Física"

→ **Cómo citar:** Mozota Frauca, Á. (2026).
Los espacio-tiempos de la relatividad general no son (tan) especiales. *Culturas Científicas*, 6(1), pp. 173-187.
https://doi.org/10.35588/cc.v6d7925

[RESUMEN]

La invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad general es una propiedad formal de la teoría que no está presente en otras teorías. Algunos autores, muy relacionados con la investigación en gravedad cuántica, han defendido que esta simetría hace que el espacio-tiempo en relatividad general no pueda ser interpretado como otros espacio-tiempos. Más concretamente, el espacio-tiempo sería solamente una estructura para representar "correlaciones". Esta posición se apoya en tres argumentos: el argumento de gauge, argumentos relacionalistas como el argumento del agujero, y la relación con gravedad cuántica. En este artículo estudio esta posición y estos argumentos y los rechazo. La posición que defiendo es que la invariancia bajo difeomorfismos no hace a los espacio-tiempos de relatividad general diferentes en ningún sentido profundo, y que estos deben interpretarse de forma análoga a otros espacio-tiempos. Más precisamente, el espacio-tiempo, tanto en relatividad general como otras teorías, es un conjunto de eventos con una serie de relaciones causales, geométricas e inerciales.

[PALABRAS CLAVES]

Relatividad general, Simetría gauge, Espacio-tiempo, Invariancia bajo difeomorfismos, Gravedad cuántica

---

[ABSTRACT]

The invariance under diffeomorphisms of general relativity is a formal property of the theory that is not present in other theories. Some authors, closely related to research in quantum gravity, have argued that this symmetry means that spacetime in general relativity cannot be interpreted like other spacetimes. More specifically, spacetime would be only a structure for representing "correlations." This position is supported by three arguments: the gauge argument, relationalist arguments such as the hole argument, and the relationship with quantum gravity. In this article, I study this position and these arguments and reject them. The position I defend is that invariance under diffeomorphisms does not make the spacetimes of general relativity different in any deep sense, and that they should be interpreted analogously to other spacetimes. More precisely, spacetime, both in general relativity and other theories, is a set of events with a series of causal, geometric, and inertial relations.

[KEY WORDS]

General relativity, Gauge symmetry, Spacetime, Diffeomorphism invariance, Quantum gravity

1. Introducción

La teoría de la relatividad general supuso un cambio fundamental en la forma en la que entendemos y conceptualizamos el espacio-tiempo. El espacio-tiempo de la relatividad general combina el espacio y el tiempo en una sola entidad, esta entidad es dinámica, y, además, permite hacer predicciones sobre "puntos" donde comienza o acaba el universo. Por si no fuera suficiente, el desarrollo de teorías de gravedad cuántica promete revolucionar todavía más nuestra imagen sobre el espacio-tiempo. De hecho, parte de la comunidad de investigadores en gravedad cuántica propone interpretaciones del espacio-tiempo en relatividad general que van mucho más allá de las interpretaciones estándar. En este sentido, estos investigadores consideran que la invariancia bajo difeomorfismos de la teoría implica cambios radicales en la forma que tenemos que entender el espacio-tiempo.

En este artículo quiero argumentar contra este tipo de postura. Es decir, defenderé que la invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad general no hace que el espacio-tiempo de la relatividad general sea aún más especial o que requiera de una interpretación más radical o exótica. Mientras que los autores en gravedad cuántica ven el espacio-tiempo de la relatividad general y otros espacio-tiempos como entidades completamente diferentes, yo voy a argumentar que pertenecen a una misma categoría y que requieren igual interpretación.

Más precisamente, en este artículo voy a defender que el espacio-tiempo está constituido por eventos o puntos del espacio-tiempo y por una serie de relaciones causales, geométricas e inerciales. Esto está en oposición a la postura de autores como Carlo Rovelli (Rovelli, 1991b, 1991c, 2004; Rovelli & Vidotto, 2022), que han defendido que el espacio-tiempo en nuestros modelos es similar a una estructura auxiliar, y que, una vez tenida en cuenta la invariancia bajo difeomorfismos, el único contenido de nuestros modelos son "correlaciones", es decir, relaciones entre diferentes variables en nuestros modelos. De esta manera, autores como Rovelli rechazan que parte de la estructura espacio-temporal de nuestros modelos, como la estructura causal o de orden, represente algo físico.

La discusión en este artículo conecta con debates antiguos sobre la interpretación de la relatividad general, la covarianza general, y la interpretación de nuestros modelos de espacio-tiempo. De hecho, ya en 1917 Kretschmann (Kretschmann, 1917) argumentó que la covarianza general no tiene contenido físico, y desde entonces mucho se ha escrito sobre el tema. Este artículo, por lo tanto, puede verse como contribuyendo a una versión contemporánea de este debate, donde yo contribuyo defendiendo una posición semejante a la de Kretschmann. Para clarificar, permítanme insistir en que mi posición es que el espacio-tiempo en relatividad general se diferencia del espacio-tiempo en otras teorías en ser dinámico y en las estructuras causales, geométricas e inerciales que presenta, pero que no requiere de una interpretación radicalmente diferente como proponen los autores de gravedad cuántica. Para más referencias sobre el debate histórico y en la filosofía de la física contemporánea, refiero al lector a (Pooley, 2017) y a las referencias allá citadas.

La estructura de este artículo es la siguiente. En la sección 2 comenzaré presentando la postura que el espacio-tiempo de la relatividad general se tiene que interpretar de manera diferente debido a la invariancia bajo difeomorfismos y los tres argumentos en que se apoya esta postura. En la sección 3 presentaré contraargumentos contra esta posición y en la sección 4 concluyo insistiendo en que el espacio-tiempo en relatividad general se tiene que interpretar de la misma manera que en otras teorías.

2. La singularidad de la relatividad general: la invariancia bajo difeomorfismos

Mientras que teorías como la mecánica Newtoniana o la relatividad especial se suelen expresar en términos de sistemas de coordenadas especiales (los sistemas de coordenadas inerciales), la relatividad general es generalmente covariante, lo que quiere decir que se expresa en términos de sistemas de coordenadas arbitrarios. Esto implica que las ecuaciones del movimiento de la relatividad son invariantes cuando se cambian las coordenadas en las que describimos el espacio-tiempo. Desde un punto de vista más técnico decimos que los modelos de relatividad describen una configuración en una variedad diferenciable de una serie de campos, que describen tanto la geometría del espacio-tiempo como su contenido en materia y otros campos. Un difeomorfismo es una transformación suave que toma una configuración y la desplaza dentro de la misma variedad. Que la relatividad general sea generalmente covariante implica que dos modelos relacionados por un difeomorfismo sean interpretados como perfectamente equivalentes: los dos describen el mismo espacio-tiempo con la misma configuración de campos físicos[1].

Diferentes autores utilizan diferentes matices o diferentes formulaciones del hecho de que la relatividad general es generalmente covariante o invariante bajo difeomorfismos, pero todos concuerdan en la parte técnica de la definición[2]. La controversia comienza a la hora de analizar si el hecho de que la teoría tenga esta simetría tiene algún tipo de contenido o consecuencia física.

Como he avanzado en la introducción, yo defiendo que no. Es decir, yo defiendo que la invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad general no tiene ninguna consecuencia física ni hace que la interpretación del espacio-tiempo en esta teoría sea radicalmente diferente a la interpretación de otros espacio-tiempos. Aquí debo puntualizar que el único sentido en que acepto que la invariancia bajo difeomorfismos tiene relevancia física es que como el espacio-tiempo de relatividad general es dinámico, entonces la teoría debe expresarse independientemente de ningún sistema de coordenadas. Esto es porque como el espacio-tiempo varía de modelo a modelo, no podemos fijar ningún sistema antes de especificar el contenido en materia y solucionar las ecuaciones del movimiento. En este sentido, la invariancia bajo difeomorfismos es una necesidad formal para tener espacio-tiempos dinámicos. Dejando esto de lado, la invariancia bajo difeomorfismos no tiene ningún otro tipo de consecuencia ni física ni a la hora de interpretar los modelos.

Esto está en contraposición con las posturas contra las que quiero argumentar en este artículo. En general, estas posiciones están muy relacionadas con los análisis que se hacen en el contexto de teorías de gravedad cuántica, pero son posiciones que en principio son defendibles ateniéndose solo a la estructura de la relatividad general y sin tener en cuenta ninguna teoría de gravedad cuántica. Por ejemplo, Carlo Rovelli (Rovelli, 1991a, 1991b, 1991c, 2004, 2011; Rovelli & Vidotto, 2022) ha sostenido que, debido a la invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad general, de toda la estructura de nuestros modelos únicamente deben considerarse como predicciones las "correlaciones". Por correlaciones, Rovelli entiende los valores que ciertas

[1] Para una discusión y definición matemáticamente más precisa, véase (Mozota Frauca, 2024a; Norton et al., 2023; Weatherall, 2021)

[2] (Pooley, 2017) recoge muchas de las sutilezas y matices presentes en las distintas definiciones de invariancia bajo difeomorfismo y en las consecuencias que tiene.

variables toman cuando otras toman otros valores. Por ejemplo, si tenemos un modelo con cinco campos escalares, las correlaciones serían funciones de la forma $\phi_1(\phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5)$, es decir, los valores que toma uno de los campos en función del resto de los campos. Esto parece llevar a Rovelli a una forma radical de relacionalismo[3], en la que las estructuras espacio-temporales no son consideradas predicciones de la teoría.

Similarmente, filósofos de la física como John Earman y Dean Rickles han defendido que la invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad general implica que el espacio-tiempo no pueda interpretarse de las maneras estándar o tradicionales, es decir, sustantivalistas o relacionalistas, sino que sea necesaria una nueva interpretación del espacio-tiempo, que sería estructuralista y no aplicable a teorías como la mecánica Newtoniana o la relatividad especial (Earman, 2006; Rickles, 2008). Además, Earman ha defendido que la invariancia bajo difeomorfismos también requiere una nueva metafísica del tiempo (Earman, 2002). En este artículo no voy a entrar en demasiado detalle sobre estas posiciones metafísicas, pero las voy a rechazar al rebatir sus argumentos y al defender que todos los modelos de espacio-tiempo (o espacio y tiempo) se pueden interpretar de manera análoga.

A continuación explico los tres argumentos por los cuales estos autores han defendido que la invariancia bajo difeomorfismos de la relatividad tiene impacto a la hora de interpretar la teoría.

2.1. Argumento de gauge

El principal argumento para defender que la invariancia bajo difeomorfismos tiene como consecuencia que el contenido de un modelo de relatividad general son solo las "correlaciones" predichas por el modelo es el argumento de gauge. Este argumento establece una analogía entre las transformaciones gauge en teorías como el electromagnetismo y los difeomorfismos en relatividad general. Las teorías gauge comparten ciertas propiedades con las teorías invariantes bajo difeomorfismos, como tener múltiples modelos equivalentes que representan la misma realidad física o tener Lagrangianos singulares. En la formulación Hamiltoniana de una teoría gauge, aparece un concepto muy útil: el concepto de observable. Un observable es una cantidad física que el modelo predice, y es independiente de cuál de los modelos equivalentes utilicemos. En el caso del electromagnetismo, el campo electromagnético es el observable de la teoría, mientras que los potenciales eléctricos y magnéticos (o, en su versión compacta, el 4-potencial A_μ) dependen de cada modelo, y no se corresponden directamente con cantidades físicas.

Para teorías gauge, en el formalismo Hamiltoniano existe una forma directa de identificar observables. Los observables O son funciones en el espacio de fases que satisfacen la relación $\{O, G\} = 0$, donde G es el generador de transformaciones gauge[4] y los corchetes representan el corchete de Poisson.

Dada la semejanza entre las teorías gauge y la relatividad general, el argumento de gauge consiste en aplicar esta forma de identificar observables al caso de la relatividad general. Es decir, según este argumento, el contenido de un modelo de relatividad general se puede expresar como el conjunto de funciones O que satisfacen $\{O, G\} = 0$ para el caso en que G es cualquier

[3]Este relacionalismo ha sido descrito y opuesto en (Mozota Frauca, 2025; Thébault, 2012, 2021)

[4]Recientemente ha habido una controversia (Mozota Frauca, 2024b; Pitts, 2014, 2022, 2024; Pooley & Wallace, 2022) sobre cuál es la mejor manera de definir transformaciones gauge en el formalismo Hamiltoniano. Para la discusión en este artículo la forma exacta de la transformación no será relevante.

generador de difeomorfismos.

Esta condición, que para el caso de las teorías gauge funciona bien, solo puede ser satisfecha por funciones que son constantes en el tiempo. Intuitivamente[5], como los difeomorfismos pueden trasladar una función en el tiempo, sólo cantidades que no varían no se ven afectadas por estas transformaciones. Por esto mismo, en la literatura los observables definidos de esta manera se conocen como "observables congelados" (*frozen observables*). Que los observables no evolucionen en el tiempo es una de las razones en (Earman, 2002) para sugerir una nueva metafísica del tiempo.

Ante este resultado, a primera vista absurdo, Rovelli (Rovelli, 1991b, 1991c) demostró que para ciertos sistemas, la situación no es tan grave. Por ejemplo, para versiones parametrizadas de la mecánica clásica se puede demostrar que existen constantes del movimiento que representan correctamente la dinámica del sistema. Más concretamente, en estos sistemas se describe la trayectoria en el espacio-tiempo de un cuerpo como dos funciones, $x(\tau)$ y $t(\tau)$ que dependen de un parámetro arbitrario τ. Bajo cambios de coordenada τ, x y t se transforman, pero se puede definir la función $X(T, x, t)$ que representa la posición para el instante $t = T$, que se mantiene constante aunque x y t evolucionen. En este sentido, existe una familia de funciones que captura el contenido del modelo y del que se puede extraer un sentido de evolución. La dinámica no sería dinámica con respecto a τ, sino con respecto a T. Por esto mismo, a estas funciones también se las conoce como "constantes del movimiento que evolucionan" (*evolving constants of motion*).

La idea de Rovelli y colaboradores es extender este análisis a teorías como relatividad general. Como $X(T, x, t)$ tiene la forma de una correlación, es decir, una relación funcional entre las variables x y t, la idea es que en teorías como relatividad general, los observables también sean correlaciones, pero entre las variables de la teoría. A partir de esta comparación, Rovelli y colaboradores han construido su visión del espacio-tiempo.

En resumen, el argumento consta de dos pasos. Primero, la analogía entre los difeomorfismos y las transformaciones gauge se utiliza para llegar a la conclusión que el contenido de la relatividad general está representado como funciones constantes. Segundo, el análisis de modelos parametrizados se emplea para argumentar que estas funciones representan correlaciones (y nada más). En la sección 3 daré motivos por los cuales creo que los dos pasos están equivocados.

2.2. Relacionalismo y argumento del agujero (*hole argument*)

La segunda motivación para argumentar que el contenido físico de un modelo de relatividad general son sólo sus "correlaciones" viene de una interpretación relacionalista de estos modelos, basada en parte en el famoso argumento del agujero (*hole argument*). Por ejemplo, (Rovelli, 2004) cita este argumento para asegurar que los observables de la relatividad general tienen que ser correlaciones.

El argumento, formulado originalmente por Einstein, explota el hecho de que en una teoría invariante bajo difeomorfismos, distintos puntos de la variedad diferenciable pueden representar el mismo evento. Para ilustrarlo, se toma una categoría de difeomorfismos muy particular:

[5]Para una justificación más técnica, véase (Kuchař, 1991, 1992, 1993; Mozota Frauca, 2023; Pitts, 2018; Pons et al., 2010)

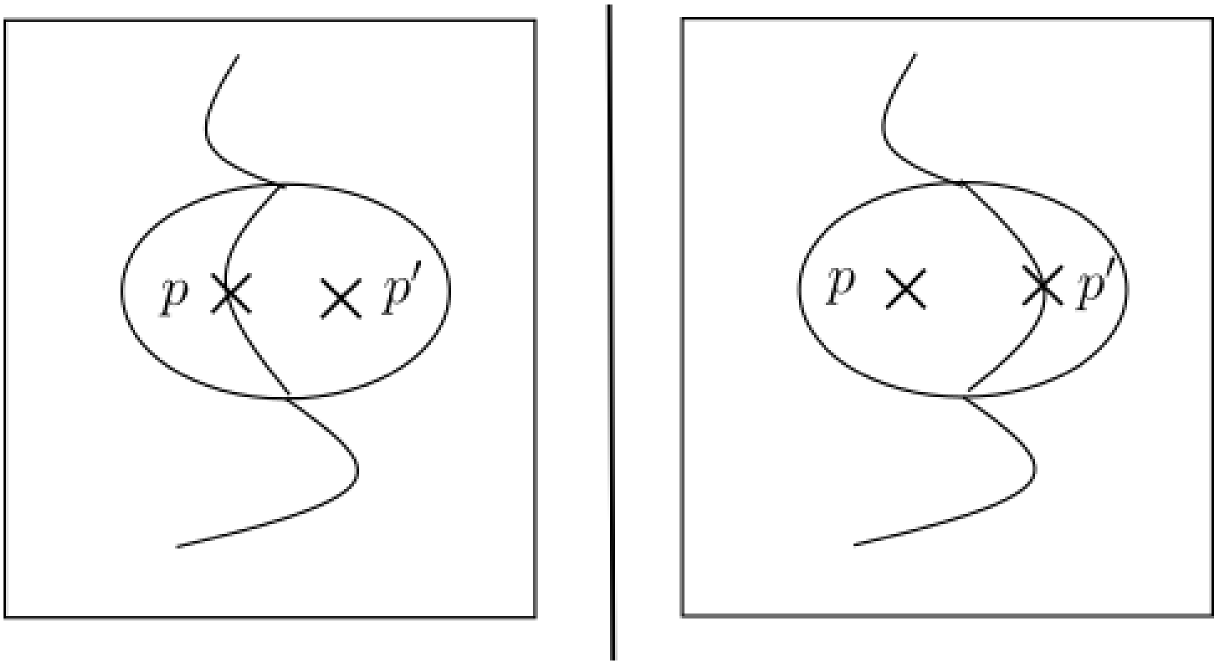

Figura 1: Argumento del agujero. Representación de dos modelos difeomórficos relacionados por una "transformación de agujero". En los dos modelos se representa la trayectoria de un cuerpo, pero en una pasa por el punto p y en la otra por el punto p'.

los difeomorfismos de agujero. Estos difeomorfismos tienen la peculiaridad de que no tienen ningún efecto en la mayor parte de la variedad salvo en una región, el agujero, donde sí que tienen un efecto. Por ejemplo, en la figura 1 se representan dos modelos relacionados por un difeomorfismo de agujero. Los dos modelos representan un espacio-tiempo en el hay un cuerpo trazando una trayectoria, pero difieren en la trayectoria dentro del agujero. En particular, en uno de los modelos la trayectoria pasa por el punto p, y en el otro pasa por p'.

Dado que diferentes modelos asignan diferentes propiedades a un mismo punto en la variedad, afirmaciones como "el cuerpo pasa por el punto p" no se consideran parte de las predicciones del modelo[6]. Por lo tanto, se ha de ser cuidadoso a la hora de hablar de puntos en el espacio-tiempo y puntos en la variedad diferencial, ya que no siempre coinciden.

La interpretación que autores como Rovelli y Earman (Earman, 2002, 2006; Rovelli, 2004) hacen del argumento del agujero es que no se puede interpretar el espacio-tiempo de la relatividad general de la misma manera que otros espacio-tiempos. Según estos autores, este argumento refuerza el argumento de gauge para afirmar que ya no podemos hablar de propiedades físicas en un punto, sino que tenemos que adoptar la interpretación en términos de correlaciones.

En particular, para Rovelli (Rovelli, 2004), el argumento (y la covarianza general de la relatividad general) implica que las coordenadas de relatividad general tienen un significado radicalmente diferente que las coordenadas en otros espacio-tiempos. Por ejemplo, en el espacio-

[6]Esta es la interpretación más extendida. Hay otra alternativa posible, que no me consta que haya nadie que la defienda, que sería afirmar que la afirmación "el cuerpo pasa por el punto p" es una predicción del modelo, y que por tanto dos modelos relacionados por un difeomorfismo representan posibilidades diferentes. La teoría de la relatividad sería indeterminista en este caso, con predicciones que no se podrían comprobar de forma empírica. En (Earman & Norton, 1987) se puede encontrar un argumento contra este tipo de posición.

tiempo de Minkowski, el espacio-tiempo de la relatividad especial, según Rovelli podemos afirmar que el valor de un campo escalar en un punto $\phi(x^\mu)$ es un observable, mientras que si estamos en un espacio-tiempo de la relatividad general, $\phi(x^\mu)$ no sería un observable. El motivo es que las coordenadas x^μ en relatividad general son arbitrarias, mientras que en relatividad especial tienen un significado bien definido. Es por esto que Rovelli asegura que necesitamos definir observables relacionales como la correlación $\phi_1(\phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5)$ de la que hablábamos más arriba. Volviendo al caso del agujero, $\phi(x^\mu)$ representaría el valor del campo en el punto p, y cambiaría de modelo a modelo, mientras que $\phi_1(\phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5)$ se mantendría constante en los dos modelos, ya que en uno estaría asociado al punto p, y en el otro al punto p'.

2.3. Gravedad cuántica

Por último, una de las motivaciones más importantes, por lo menos desde el punto de vista histórico, que llevaron a autores como Rovelli a adoptar la postura que tienen sobre la relatividad general es la relación con teorías o prototeorías de gravedad cuántica. De hecho, si no se hubiera intentado cuantizar la relatividad general utilizando el formalismo Hamiltoniano siguiendo la cuantización de Dirac, parece bastante improbable que nadie hubiera defendido posiciones como las de Rovelli o Earman.

El procedimiento de cuantización de Dirac se emplea para cuantizar teorías gauge, y dada la analogía entre teorías gauge y teorías invariantes bajo difeomorfismos, muchos autores han aplicado este procedimiento a la relatividad general. El resultado es similar en algunos aspectos a lo que encontramos en la sección 2.1 cuando discutimos la invariancia bajo difeomorfismos como una simetría gauge. Como los difeomorfismos generan desplazamientos temporales, encontramos que imponer invariancia es equivalente a tener estados y observable que no evolucionan en el tiempo. Este es el famoso problema del tiempo de la gravedad cuántica[7].

El argumento, implícito muchas veces, por parte de la comunidad de gravedad cuántica parece ser: ya que en la teoría cuántica parece que necesitamos un cambio radical en nuestra forma de entender el espacio-tiempo, ¿por qué no adoptar este cambio antes, en la teoría clásica? Las relaciones entre los formalismos cuánticos y clásicos hacen que la búsqueda de consistencia sea lógica y atractiva: si en la teoría cuántica tenemos observables que no evolucionan en el tiempo, parece coherente adoptar la misma posición en la teoría clásica.

Además, hay una diferencia entre el caso clásico y cuántico. Mientras en el caso de relatividad general hay muchas posiciones disponibles sobre cómo formalizar y conceptualizar la teoría, en el caso cuántico parece no haber muchas alternativas. Es decir, como hay pocas cuantizaciones de la relatividad general disponibles, y estas siguen la cuantización de Dirac o alguna equivalente, parece que el problema del tiempo es inescapable. Esto quiere decir que en estas teorías de gravedad cuántica no hay disponible una alternativa en la que podamos entender la evolución temporal de una forma más “tradicional”.

[7] Para discusiones en detalle sobre el problema del tiempo, véase (Isham, 1993; Kuchař, 1992; Mozota Frauca, 2023, 2024c)

3. Rebatiendo estos argumentos

Una vez expuesta la posición que quiero rebatir en este artículo, y los argumentos en que se apoya, en esta sección presento contraargumentos por los cuales creo que los argumentos anteriores no son válidos.

3.1. Difeomorfismos y gauge

En la sección 2.1 he presentado el argumento de gauge como un argumento en dos pasos. El primero es establecer una analogía entre transformaciones gauge y difeomorfismos, para incorporar el concepto de observable, que para teorías invariantes bajo difeomorfismos tienen que ser constantes del movimiento. El segundo es extender el análisis de modelos parametrizados para concluir que el único contenido de los modelos son correlaciones. Creo que en los dos pasos del argumento hay problemas serios que hacen que el argumento no sea válido.

En primer lugar, creo que la analogía entre transformaciones gauge y difeomorfismos es limitada. Diversos autores han argumentado en detalle por qué creemos que esto es así (Kuchař, 1993; Mozota Frauca, 2023, 2024c, 2024a; Pitts, 2018; Pons et al., 2010; Pons & Salisbury, 2005). Muy sintéticamente, podemos decir que los difeomorfismos pueden ser entendidos como transformaciones gauge desde un punto de vista global, pero no desde un punto de vista local. Es decir, si consideramos modelos enteros relacionados por difeomorfismos, claramente son equivalentes y el difeomorfismo puede ser entendido como una teoría gauge. Pero si miramos el efecto de un difeomorfismo en un punto de la variedad (o en un valor de las coordenadas), el efecto es que este punto matemático ahora representa otro evento (punto "físico") y no podemos afirmar que la transformación deje intacto el contenido físico descrito en un punto. En este sentido, no tiene sentido pedir que los observables sean invariantes. Antes y después de la transformación, el mismo punto matemático representa eventos diferentes y, por tanto, uno espera que los campos físicos cambien de valor bajo estas transformaciones. Por ejemplo, si tenemos un campo escalar (un campo de temperatura, por ejemplo), este tomará valores diferentes en puntos del espacio-tiempo diferentes. Transformar el valor en un punto según un difeormofismo no se corresponde con una representación diferente de lo que sucede en un punto fijo, sino con dos situaciones físicas diferentes.

Permítanme una analogía para ilustrar esto. Los modelos de espacio-tiempo se pueden entender de una forma parecida a como entendemos los mapas. Un mapa es una representación, digamos en papel, de la geografía de una parte del planeta. En este sentido, el mapa es análogo a un modelo de espacio-tiempo: en ambos casos tenemos puntos en nuestra representación (puntos en papel en el mapa, puntos matemáticos en el modelo) que representan puntos en la realidad (puntos sobre la superficie de la tierra o eventos en el espacio-tiempo). Un difeomorfismo se corresponde con cambiar un mapa por otro. Cuando cambiamos de mapa, puede que cambie la orientación, la escala, o la parte del mundo que representamos. Por esto, lo más normal es que un mismo punto en el papel (por ejemplo, el que está en el centro del mapa), represente un punto geográfico diferente. En el caso de los difeomorfismos, sucede lo mismo: cuando cambiamos de representación, cambiamos la relación entre los puntos en el modelo con los puntos en el mundo real. Desde este punto de vista, no tiene sentido decir que lo que representa el mapa o el modelo de espacio-tiempo es lo que no cambia en un punto de la representación cuando cambiamos de representación. Esto sería decir que las propiedades de un punto tienen que ser las mismas no importa qué represente. En el ejemplo, no importaría si un punto representa Barcelona o si representa Buenos Aires, que tendría que tener las mismas propiedades.

Por este motivo, creo que hay rechazar la analogía con teorías gauge y la definición de observable. Tenemos un entendimiento claro de cuáles son las predicciones de la relatividad y la invariancia bajo difeomorfismos no supone ningún obstáculo para ello. La definición de observable no es necesaria, y en nuestra comprensión de los modelos de relatividad general incluimos mucho más que correlaciones.

Relacionado con esto, también creo que la segunda parte del argumento se puede rechazar. Por una parte, la analogía entre sistemas parametrizados y relatividad general es problemática, ya que la relatividad general no es una teoría parametrizada. Las correlaciones que se pueden definir para los modelos parametrizados son sencillas y pueden cubrir el contenido físico de un modelo parametrizado, ya que encontrar estas correlaciones es equivalente a deparametrizar la teoría[8].

Para el caso de relatividad general, como la teoría no es parametrizable, la construcción de cantidades invariantes es mucho más complicada, y, de hecho, se puede demostrar que para modelos generales las correlaciones no se corresponden con funciones continuas y diferenciables que satisfacen $\{O, G\} = 0$. Aun así, la definición se podría modificar para incluir este tipo de funciones como observables.

Podemos considerar por ejemplo un sistema de tres osciladores armónicos con frecuencias diferentes (y que no sean múltiplos enteros de una misma frecuencia) y las correlaciones entre las posiciones de estos. Una correlación que se puede construir como invariante es la función $X_3(X_1, X_2, x_1, p_1, x_2, p_2, x_3, p_3)$ que representa la posición del tercer oscilador en función de las posiciones de los otros dos y de las coordenadas de un punto en el espacio de fases. Se puede demostrar que esta cantidad es invariante si se transforman las coordenadas $x_1, p_1, x_2, p_2, x_3, p_3$ según un difeomorfismo, o, lo que es equivalente, evolucionando estas coordenadas según la dinámica del sistema. Desde un punto de vista intuitivo, esto es así porque la función X_3 calcula el valor de la posición tomando $x_1, p_1, x_2, p_2, x_3, p_3$ como condiciones iniciales, y cambiar las condiciones iniciales por otras en la misma trayectoria no afecta al resultado.

Explicado con otro ejemplo, dado un modelo determinista del sistema solar, no importa si tomo el estado del sistema solar ahora, o el estado del sistema solar dentro de un año como condiciones iniciales para hacer la predicción de cuál va a ser la posición de Júpiter cuando la Tierra, el Sol y Marte estén alineados. Elija el momento que elija, la predicción será la misma.

Las correlaciones pueden por tanto ser definidas como cantidades invariantes (incluso si no lo creemos necesario), y Rovelli considera que cubren todo el contenido del modelo. Sin embargo, esto no es cierto: el modelo incluye mucho más que eso. En particular, nuestro modelo incluye relaciones espacio-temporales. Por ejemplo, el modelo puede predecir que los osciladores 1 y 2 toman las siguientes parejas de posiciones en este orden: (1,0), (2,1), (0,0). Las correlaciones X_3 predicen correctamente los valores que tomará el tercer oscilador en cada caso, pero no nos dicen nada sobre el orden. Si consideramos, como creo que debemos considerar, que las relaciones espacio-temporales forman parte de nuestros modelos, las correlaciones no cubren todo.

El argumento para rechazar la relación de orden en nuestro ejemplo sería que no es

[8] Este punto y sus consecuencias están analizados en detalle en (Mozota Frauca, 2023, 2024c)

una cantidad invariante, pero esto no es cierto. Es decir, podemos construir una función $O(X_1, X_2, X'_1, X'_2, x_1, p_1, x_2, p_2, x_3, p_3)$ que valga 1 si la pareja X_1, X_2 sucede antes que la pareja X'_1, X'_2 o -1 si el orden es el contrario. Igual que antes, se puede demostrar que esta función es invariante si se cambian las condiciones iniciales. Para el caso de la relatividad general, lo mismo aplica: cualquier predicción del modelo, no sólo las correlaciones, se puede escribir como función de las condiciones iniciales de forma que sea invariante, y por tanto la afirmación que sólo las correlaciones son físicamente relevantes no se sustenta[9].

En resumen, la analogía entre teorías gauge y teorías con invariancia bajo difeomorfismos no se sustenta dadas las diferencias entre los distintos tipos de transformaciones, pero incluso si aceptáramos la analogía, la condición de invariancia no selecciona solo las correlaciones, sino que toda la estructura espacio-temporal de la teoría tendría que ser considerada observable y parte de nuestros modelos.

3.2. Argumento del agujero en otras teorías

El argumento del agujero, tal como lo plantean Rovelli y Earman, es sorprendente en su conclusión, ya que su análisis difiere mucho de los análisis estándar en la literatura. Según la gran mayoría de autores (posición que yo comparto)[10], la conclusión del argumento del agujero es que hay dos interpretaciones sobre qué representan nuestros modelos de espacio-tiempo, conocidas como relacionalismo y sustantivalismo sofisticado. Ninguna de las dos afirma o implica que todo el contenido de nuestros modelos sean las correlaciones, así que parece que el análisis estándar de la literatura sirve para refutar la posición de Earman y Rovelli.

También es importante rebatir la posición de Rovelli sobre el distinto rol y significado de las coordenadas en relatividad general y otros modelos de espacio tiempo. Para Rovelli, que la relatividad general se exprese en lenguaje de la geometría diferencial tiene las implicaciones que estamos comentando en este artículo. Pero como es bien conocido, cualquier teoría se puede expresar de una forma covariante en términos de campos sobre una variedad diferencial. Esto permite trasladar los argumentos relacionalistas, y el argumento del agujero, a otras teorías. Por ejemplo, podemos considerar el argumento para el caso de un espacio-tiempo Newtoniano.

A pesar de esto, Rovelli insiste en que hay una diferencia entre ambas teorías. Las coordenadas de la mecánica Newtoniana estarían asociadas con objetos de medida como relojes y cintas métricas, mientras que en el caso de la relatividad general son arbitrarias. Este punto del argumento parece especialmente débil, ya que en el caso de la relatividad general también podemos asociar las coordenadas en un modelo (esto implica que la métrica está definida) a las mediciones de relojes y cintas métricas. En este sentido, dado que ambas teorías se pueden expresar de una manera análoga y la interpretación también es análoga[11], cuesta ver ninguna diferencia que justifique una interpretación diferente de la relatividad general.

Una posibilidad para Rovelli sería buscar una interpretación en términos de correlaciones también de la mecánica Newtoniana, y parece que en algunos pasajes[12] muestra una cierta

[9]Todas estas afirmaciones técnicas las demuestro en un artículo técnico que se encuentra en revisión en el momento de escribir este artículo.

[10]En el artículo de enciclopedia (Norton et al., 2023) se puede encontrar una discusión en detalle de estas posiciones y una lista actualizada de la literatura en el tema.

[11]En (Mozota Frauca, 2024a) desarrollo la analogía en mucho más detalle y profundidad.

[12]Véase la sección de mecánica Newtoniana en (Rovelli, 2011).

inclinación a hacerlo, pero esto estaría en tensión con la motivación de gauge que no aplica en el caso de la mecánica Newtoniana. Otra debilidad de esta posición es que en mecánica Newtoniana nadie ha defendido el tipo de posición que defiende Rovelli, y ciertamente no parece una posición atractiva.

3.3. El problema del tiempo es un problema, no una solución

Por último, la tercera motivación es la relación con teorías de gravedad cuántica. Como he comentado, el resultado de aplicar la cuantización canónica a la teoría de la relatividad general es un formalismo sin evolución temporal, y esto encaja bien con la visión de que los observables en relatividad general son constantes del movimiento.

Este tipo de razonamiento corre el riesgo de ser circular. Si el análisis de la teoría clásica se justifica en el modelo cuántico, ¿en qué se justica el modelo cuántico? Una rápida revisión de la literatura permite ver que el modelo cuántico muchas veces se justifica en razonamientos clásicos, y por tanto, no se trata de una justificación independiente.

El análisis en este artículo pone en duda el análisis puramente clásico, y por tanto, para que la relación con la teoría cuántica fuera una motivación atractiva para justificar la posición de autores comos Rovelli y Earman, necesitaríamos que la teoría cuántica estuviera bien justificada y fuera tan independiente de la clásica como fuera posible.

Mi opinión es que este no es el caso. El problema del tiempo hace que la interpretación y justificación de los modelos cuánticos construidos al cuantizar modelos invariantes bajo difeomorfismos quede seriamente cuestionada, si es que son posibles. Igual que pasaba en el caso clásico, la comparación con modelos parametrizados, común en la literatura, puede llevar a equívocos. En este sentido, si como yo y otros autores en la literatura[13] se considera que hay serios motivos para dudar de que los métodos de cuantización canónica son aplicables a la relatividad general, entonces cualquier argumento que se base en estas teorías de gravedad cuántica para justificar una interpretación de la teoría clásica tendrá muy poca fuerza.

4. Conclusiones

En este artículo he presentado y rebatido la posición que algunos autores, influenciados por la investigación en gravedad cuántica, tienen sobre cómo interpretar el espacio-tiempo en relatividad general. Estos autores defienden que en relatividad general el espacio-tiempo es sólo una estructura auxiliar para representar el "auténtico" contenido de nuestros modelos, que serían las correlaciones entre variables físicas. Esto estaría en contraposición con otros modelos de espacio-tiempo (o de espacio y tiempo), en los que sí que es posible interpretar la evolución como evolución en el espacio y el tiempo.

En este artículo he analizado los tres principales argumentos para mantener esta postura y los he rechazado. La posición que defiendo sobre qué es el espacio-tiempo y cómo interpretarlo en nuestros modelos, es que el espacio-tiempo es un conjunto de eventos con una serie de relaciones causales, geométricas e inerciales. Estas relaciones forman parte de las predicciones de nuestros modelos y son observables en el sentido más intuitivo del término. Esto es cierto

[13] Otra vez, véase (Isham, 1993; Kuchař, 1992; Mozota Frauca, 2023, 2024c)

para todos nuestros modelos de espacio-tiempo, incluidos los modelos de relatividad general. En este sentido, los espacio-tiempos de relatividad general son exactamente iguales al resto.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Sebastián Fortín por su invitación a colaborar en este número especial y a participar en varias ocasiones en las Jornadas de Fundamentos, Filosofía e Historia de la Física. También quiero agradecer al público en estos eventos, que con sus preguntas y comentarios han ayudado a dar forma a las ideas en este artículo.

Financiamiento

Agradezco a la Universitat Politècnica de Catalunya su apoyo económico durante este proyecto.

Referencias

Chataignier, L., Hoehn, P. A., Lock, M. P. E., & Mele, F. M. (2024). *Relational Dynamics with Periodic Clocks* (arXiv:2409.06479). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.06479

Dittrich, B., Hoehn, P. A., Koslowski, T. A., & Nelson, M. I. (2015). *Chaos, Dirac observables and constraint quantization*. https://arxiv.org/abs/1508.01947v1

Dittrich, B., Höhn, P. A., Koslowski, T. A., & Nelson, M. I. (2017). Can chaos be observed in quantum gravity? *Physics Letters B*, *769*, 554–560. https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.02.038

Earman, J. (2002). Thoroughly Modern Mctaggart: Or, What Mctaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity. *Philosophers' Imprint*, *2*(3), 1–28.

Earman, J. (2006). The Implications of General Covariance for the Ontology and Ideology of Spacetime. *Philosophy and Foundations of Physics*, *1*(C), 3–23. https://doi.org/10.1016/S1871-1774(06)01001-1

Earman, J., & Norton, J. (1987). What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Story. *Https://Doi.Org/10.1093/Bjps/38.4.515*, *38*(4), 515–525. https://doi.org/10.1093/BJPS/38.4.515

Isham, C. J. (1993). Canonical Quantum Gravity and the Problem of Time. In *Integrable Systems, Quantum Groups, and Quantum Field Theories* (pp. 157–287). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1980-1_6

Kretschmann, E. (1917). Über den Physikalischen Sinn der Relativitätspostulate. *Annalen Der Physik*, *53*, 575–614.

Kuchař, K. V. (1991). The problem of time in canonical quantization of relativistic systems. In A. Ashtekar & J. Stachel (Eds.), *Conceptual Problems of Quantum Gravity* (p. 141). Birkhauser. https://philpapers.org/rec/KUCTPO-3

Kuchař, K. V. (1992). Time and interpretations of quantum gravity. In G. Kunstatter, D. Vincent, & J. Williams (Eds.), *Proceedings of the 4th Canadian Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics*. World Scientific Publishing Company. https://doi.org/10.1142/S0218271811019347

Kuchař, K. V. (1993). Canonical Quantum Gravity. *General Relativity and Gravitation*, *1992*, 119.

Mozota Frauca, Á. (2023). Reassessing the problem of time of quantum gravity. *General Relativity and Gravitation*, *55*(1), 21. https://doi.org/10.1007/s10714-023-03067-x

Mozota Frauca, Á. (2024a). GPS observables in Newtonian spacetime or why we do not need 'physical' coordinate systems. *European Journal for Philosophy of Science*, *14*(4), 51. https://doi.org/10.1007/s13194-024-00611-7

Mozota Frauca, Á. (2024b). In Which Sense Can We Say That First-Class Constraints Generate Gauge Transformations? *Philosophy of Physics*. https://doi.org/10.31389/pop.48

Mozota Frauca, Á. (2024c). The Problem of Time for Non-Deparametrizable Models and Quantum Gravity. In F. Bianchini, V. Fano, & P. Graziani (Eds.), *Current Topics in Logic and the Philosophy of Science. Papers from SILFS 2022 postgraduate conference.* (Vol. 4). College Publications. https://philsci-archive.pitt.edu/24052/

Mozota Frauca, Á. (2025). Against Radical Relationalism: In Defense of the Ordinal Structure of Time. *Foundations of Physics*, *55*(3), 37. https://doi.org/10.1007/s10701-025-00850-5

Norton, J. D., Pooley, O., & Read, J. (2023). The Hole Argument. In E. N. Zalta & U. Nodelman (Eds.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2023). Metaphysics Research Lab, Stanford University. https://plato.stanford.edu/archives/sum2023/entries/spacetime-holearg/

Pitts, J. B. (2014). A first class constraint generates not a gauge transformation, but a bad physical change: The case of electromagnetism. *Annals of Physics*, *351*, 382–406. https://doi.org/10.1016/j.aop.2014.08.014

Pitts, J. B. (2018). Equivalent Theories and Changing Hamiltonian Observables in General Relativity. *Foundations of Physics*, *48*(5), 579–590. https://doi.org/10.1007/s10701-018-0148-1

Pitts, J. B. (2022). *First-Class Constraints, Gauge Transformations, de-Ockhamization, and Triviality: Replies to Critics, Or, How (Not) to Get a Gauge Transformation from a Second-Class Primary Constraint.* https://doi.org/10.48550/arxiv.2212.02944

Pitts, J. B. (2024). Does a second-class primary constraint generate a gauge transformation? Electromagnetisms and gravities, massless and massive. *Annals of Physics*, *462*, 169621. https://doi.org/10.1016/j.aop.2024.169621

Pons, J. M., & Salisbury, D. C. (2005). Issue of time in generally covariant theories and the Komar-Bergmann approach to observables in general relativity. *Physical Review D*, *71*(12), 124012. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.124012

Pons, J. M., Salisbury, D. C., & Sundermeyer, K. A. (2010). Observables in classical canonical gravity: Folklore demystified. *Journal of Physics: Conference Series*, *222*(1), 012018. https://doi.org/10.1088/1742-6596/222/1/012018

Pooley, O. (2017). Background Independence, Diffeomorphism Invariance and the Meaning of Coordinates. In D. Lehmkuhl, G. Schiemann, & E. Scholz (Eds.), *Towards a Theory of Spacetime Theories* (pp. 105–143). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3210-8_4

Pooley, O., & Wallace, D. (2022). *First-class constraints generate gauge transformations in electromagnetism (reply to Pitts)*. https://doi.org/10.48550/arxiv.2210.09063

Rickles, D. (2008). Chapter 7 Who's Afraid of Background Independence? In D. Dieks (Ed.), *Philosophy and Foundations of Physics* (Vol. 4, pp. 133–152). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1871-1774(08)00007-7

Rovelli, C. (1991a). Quantum evolving constants. Reply to Çomment on 'Time in quantum gravity: An hypothesis' ". *Physical Review D*, *44*(4), 1339. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.44.1339

Rovelli, C. (1991b). Time in quantum gravity: An hypothesis. *Physical Review D*, *43*(2), 442. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.43.442

Rovelli, C. (1991c). What is observable in classical and quantum gravity? *Classical and Quantum Gravity*, *8*(2), 297. https://doi.org/10.1088/0264-9381/8/2/011

Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511755804

Rovelli, C. (2011). "Forget time" Essay written for the FQXi contest on the Nature of Time. *Foundations of Physics*, *41*(9), 1475–1490. https://doi.org/10.1007/s10701-011-9561-4

Rovelli, C., & Vidotto, F. (2022). *Philosophical Foundations of Loop Quantum Gravity*. https://arxiv.org/abs/2211.06718v2

Thébault, K. P. Y. (2012). Three denials of time in the interpretation of canonical gravity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, *43*(4), 277–294. https://doi.org/10.1016/J.SHPSB.2012.09.001

Thébault, K. P. Y. (2021). The Problem of Time. In E. Knox & A. Wilson (Eds.), *The Routledge Companion to Philosophy of Physics*. Routledge. https://www.routledge.com/The-Routledge-Companion-to-Philosophy-of-Physics/Knox-Wilson/p/book/9781138653078#

Weatherall, J. O. (2021). Classical Spacetime Structure. In *The Routledge Companion to Philosophy of Physics*. Routledge.

