



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Sobre el Sustancialismo de Campo  
Métrico en el Contexto de la Relatividad  
General

T E S I S

que para optar por el grado de:

Licenciado en Filosofía

Presenta:

CARLOS GERARDO SANJUÁN CIEPIELEWSKI

NÚMERO DE CUENTA: 408016764



DIRECTOR DE TESIS:

ELIAS OKON GURVICH

2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*Dedicado a  
Daniel y Aleksander, mis hermanos*

---

# Agradecimientos

Si algo de este texto tiene algún valor se lo debo principalmente a Elias Okon, mi asesor. También a Axel Barceló, Nydia Lara, Edgar González y Cristian Gutiérrez por sus comentarios y sugerencias. Del mismo modo, a mi querido amigo Ricardo de Santiago por las discusiones que mantuvimos y por tomarse la molestia de revisar el texto final.

A mis padres, Grazyna y Jaime, les agradezco el apoyo que me proporcionaron durante el tiempo que duró la carrera, sin su apoyo no sólo no habría podido hacer este texto. También agradezco a mi amiga Dominique Menkes por su ayuda en todo momento y a Tania Cabrera, con quien tanto he compartido, por su comprensión y cariño.

---

# Introducción

A inicios del siglo XVIII, Gottfried Wilhelm Leibniz y Samuel Clarke, un filósofo inglés, debatieron sobre el estatus del espacio en una serie de cartas que cesó cuando Leibniz murió. La base de su discusión fue la física novedosa que Newton había expuesto en sus *Principia* medio siglo atrás y, en especial, el concepto de ‘espacio absoluto’ que introdujo en ella.

En nuestros días un debate similar, aunque no idéntico, se discute dentro de la filosofía de la física. La cuestión, unos suponen, es si el espaciotiempo existe de forma independiente a la materia dentro del contexto de la teoría de la relatividad general. Hay quienes, no obstante, en años recientes han arrojado dudas acerca del sentido de la discusión general. En la actualidad, podría pensarse, la discusión se da más entre quienes mantienen una postura escéptica acerca del sentido del debate y los que creen que éste es genuino.

En este nuevo debate se hallan quienes defienden las posturas heredadas de Leibniz y Clarke contra quienes argumentan contra el sentido del debate mismo. Mi postura sobre el debate se encuentra del lado escéptico.

Para quien duda del sentido de la discusión sobre el estatus del espaciotiempo hay dos grandes retos. El primero consiste en desechar las teorías de quienes sostienen alguna posición particular en el debate. El segundo reto consiste en argumentar en contra del debate mismo. Esta tesis está enfocada al primer reto, criticar a las teorías que existen sobre el estatus del espaciotiempo. En particular, argumentaré en contra de una teoría que posee algo de popularidad actualmente, el *sustancialismo de campo métrico*.

---

El sustancialista de campo métrico considera que el espaciotiempo existe de forma independiente de cualquier otra entidad en el universo. Además, considera que el espaciotiempo está constituido por puntos espaciotemporales con propiedades específicas.

El primer capítulo de este texto tiene como objetivo ser una introducción al debate entre sobre el espaciotiempo en su forma clásica y actual. Para esto se da una descripción general sobre la discusión entre Clarke y Leibniz, se señalan algunos elementos de la teoría de la relatividad especial así como de la general y se menciona de forma breve uno de los argumentos más importantes dentro del debate actual: el llamado *argumento del agujero*.

La historia sobre el surgimiento del sustancialismo de campo métrico, así como su descripción detallada, será abordada en el segundo capítulo. Dentro de esta teoría hay dos formas de entender a las propiedades del espaciotiempo. En el segundo capítulo argumentaré que sólo una de estas formas genera una teoría sustancialista viable.

El tercer capítulo está dedicado a responder a los argumentos que pueden ofrecerse a favor del sustancialismo de campo métrico y a argumentar en contra de esta teoría. Poco más arriba comenté que soy escéptico sobre el sentido de la discusión general sobre el estatus del espaciotiempo y que mi tesis se centra en criticar a una teoría que pretende dar respuesta a la discusión. No debe suponerse, sin embargo, que dentro de este texto no hay argumentos que puedan funcionar para soportar la idea de que el debate no está bien planteado en los términos actuales. Las tres críticas que hago del sustancialismo de campo métrico en el tercer capítulo bien pueden



---

arrojar luz sobre el hecho de que la discusión general en nuestros días es oscura y carece de sentido.

Cuando me refiera al ‘espaciotiempo’ en este texto no me estaré refiriendo a una noción técnica que se use dentro de la física de nuestros días. Más bien, me refiero a esa *cosa* del sentido común que parece estar allá afuera en el mundo y que nos causa perplejidad por lo distinta que es de otros objetos.

# Índice general

<b>introduccion</b>	<b>9</b>
<b>1. Espaciotiempo</b>	<b>11</b>
1.1. El debate clásico . . . . .	11
1.1.1. Newton y los <i>Principia</i> . . . . .	11
1.1.2. Leibniz y Clarke . . . . .	18
1.1.3. Comentarios finales sobre el debate clásico . . . . .	20
1.2. Relatividad especial y teoría de la relatividad general . . . . .	21
1.2.1. Relatividad especial . . . . .	22
1.2.2. Teoría de la relatividad general . . . . .	29
1.2.3. La solución de Einstein . . . . .	33
1.3. Argumento del agujero . . . . .	36
1.3.1. Covarianza general . . . . .	37
1.3.2. Transformación de agujero . . . . .	38
1.3.3. Consecuencias indeseables . . . . .	39
<b>2. Sustancialismo de campo métrico</b>	<b>41</b>
2.1. Respuestas al argumento del agujero . . . . .	41

2.2. Antihaeceitism . . . . .	45
2.2.1. Métrica material . . . . .	47
2.2.2. Métrica indeterminada . . . . .	54
<b>3. Los argumentos sobre el sustancialismo</b>	<b>57</b>
3.1. Argumentos a favor del sustancialismo de campo métrico . . . . .	58
3.1.1. Brighthouse y el <i>antihaeceitism</i> . . . . .	58
3.1.2. Argumento de la energía del espaciotiempo . . . . .	61
3.1.3. Argumento del compromiso ontológico de los puntos espacio- temporales . . . . .	64
3.1.4. Argumento de la indispensabilidad del espaciotiempo . . . . .	65
3.2. Argumentos en contra del sustancialismo de campo métrico . . . . .	68
3.2.1. Argumento de la falta de una base conceptual en el debate . . . . .	68
3.2.2. Argumento de la falta de diferencia entre sustancialismo y relacionismo . . . . .	70
3.2.3. Argumento de la parsimonia . . . . .	76
<b>Conclusiones</b>	<b>80</b>

# Capítulo 1

## Espaciotiempo

### 1.1. El debate clásico

#### 1.1.1. Newton y los *Principia*

En julio del 1687 se publican los *Philosophæ Naturalis Principia Mathematica* de Newton. En esta obra aparecen las famosas leyes del movimiento de Newton, la ley de la gravitación universal y una derivación de las leyes del movimiento planetario de Kepler (las cuales Kepler había obtenido antes de forma empírica). En los *Principia*, después de una serie de definiciones y antes de la presentación de las leyes del movimiento, hay un escolio donde Newton introduce la distinción entre las nociones absolutas y las relativas del espacio, el tiempo, el movimiento y la posición.

I must observe, that the vulgar conceive those quantities [espacio, tiempo, posición y movimiento] under no other notions but from the relation they bear to sensible objects. And thence arise certain prejudices, for the removing

of which, it will be convenient to distinguish them into absolute and relative, true and apparent, mathematical and common.[Newton, 1846, p. 77]

Dejaremos para un poco más adelante las razones de Newton para considerar importantes dentro de su teoría a las distinciones del escolio. Por ahora, nos centraremos en tratar de entender a las distinciones y luego pasaremos a dar una descripción, lo más precisa que podamos, de las nociones absolutas de espacio, tiempo, posición y movimiento.

Las distinciones del escolio de los *Principia* entre elementos absolutos y relativos del espacio, el tiempo, la posición y el movimiento corresponde a una distinción entre lo que Newton consideraba aparente y lo que consideraba real. Las partes relativas eran las aparentes y, por lo mismo, las poco importantes para las verdades matemáticas y filosóficas; por otro lado, las absolutas eran las reales y apropiadas para indagar sobre la verdad.[Newton, 1846, p. 82]

En el caso del espacio, Newton consideraba que la noción relativa del mismo correspondía al espacio al que nos referimos cuando hablamos del espacio que ocupa, por ejemplo, una caja o una casa; el espacio absoluto sería, por otro lado, el contenedor de todo lo que hay en el universo. Imagina que hay una caja de zapatos frente a ti y que ésta no se mueve con respecto al lugar donde estás leyendo esto (*i.e.*, si estás en una habitación esto quiere decir que la caja no se mueve con respecto a la habitación). El espacio relativo de la caja sería el mismo mientras no se moviera en relación a la habitación; sin embargo, como el lugar donde estás se mueve junto con todo lo que está en él a partir del movimiento de la Tierra alrededor del sol, la caja ocuparía un espacio absoluto distinto siempre que la Tierra también lo haga.

El caso del tiempo es más complejo. Newton pone como ejemplos de tiempo relativo a una hora, un día, un mes y a un año; lo común a estos, nos dice Newton, es que son formas sensibles y externas de mediciones de la duración por medio del movimiento.[Newton, 1846, p.77]. Por ejemplo, un día se define como el lapso que emplea el sol en estar dos veces consecutivas en el meridiano de un observador, pero como dicho lapso varía dependiendo de la época del año, entonces la duración de un día no es siempre la misma. Así, un día es un tiempo relativo al movimiento aparente del sol y como tal varía dependiendo de dicho movimiento. Hasta aquí no hay gran complicación, pero ésta surge cuando queremos describir qué es el tiempo absoluto o dar un ejemplo del mismo; Newton sólo nos dice que es algo que no es relativo a nada y que no puede ser modificado. Me temo que no puedo ser más claro sobre este punto.

Para distinguir los dos tipos de posiciones podemos traer de nuevo el ejemplo de la caja que utilizamos con el espacio. Si nuestra caja estuviera a dos metros de distancia de un escritorio, entonces su posición relativa al escritorio serían dos metros de distancia. Por otro lado, como la caja, el escritorio y el lugar donde éstos están se mueven junto con la Tierra, su posición absoluta también cambiará siempre que la de la Tierra también lo haga. Lo especial de las posiciones absolutas está en que son relativas al espacio absoluto y no a ningún otro objeto. Las relativas, por otro lado, sólo señalan el lugar de un objeto en relación a otro.

Sobre los movimientos absolutos y relativos. Un movimiento es absoluto cuando es movimiento en relación al espacio absoluto. Es relativo cuando es movimiento en relación a otros objetos. Si tomamos nuestra caja y la lanzamos hacia otro objeto,

digamos un escritorio, entonces la caja se movería de forma relativa al escritorio. Ahora, si la caja y el escritorio estuvieran en una misma habitación que se encuentra en la Tierra, dichos objetos se moverían de forma absoluta si la Tierra lo hace e inclusive cuando ambos objetos están en reposo relativo.

Acabamos de ver las distinciones del escolio de los *Principia*. Las nociones absolutas de estas entidades, según Newton, tienen algunas propiedades interesantes que ahora trataremos. El espacio y el tiempo absolutos son inmutables en el sentido de que no pueden ser modificados por nada. Además, son siempre los mismos. Una característica importante de las posiciones absolutas y del espacio absoluto está en que no podemos determinar cual es la posición absoluta de un cuerpo y, lo que es lo mismo, su posición con respecto al espacio absoluto. La única forma de saber si un cuerpo está en reposo con respecto al espacio absoluto es encontrando otro objeto con el que esté en reposo relativo que esté en reposo con el espacio absoluto. Sin embargo, como no sabemos de ningún cuerpo que esté en reposo absoluto no podemos utilizar este método para saber si otro objeto lo está. Si no podemos determinar la posición de un cuerpo con respecto al espacio absoluto, ¿cómo es que el espacio absoluto tiene algún significado físico? La respuesta de Newton se mostrará en un momento cuando veamos sus argumentos a favor del espacio absoluto.

Los argumentos de Newton a favor del espacio absoluto hacen uso de la distinción entre movimientos absolutos y movimientos relativos de forma amplia. Newton creía que podemos determinar si un cuerpo se encuentra moviéndose de forma absoluta o relativa a partir de sus causas y efectos.[Newton, 1846, p.81]

Según Newton, el movimiento absoluto sólo surge o es modificado en un cuerpo cuando una fuerza es aplicada al mismo, mientras que el movimiento relativo puede surgir o modificarse sin que haya ninguna fuerza involucrada. Si dos cuerpos iguales están en reposo relativo entre ellos, adquirirán movimiento absoluto si se les aplica una fuerza y, si esta es igual para ambos y tiene la misma dirección, entonces pese a que hay movimiento absoluto en los cuerpos éstos no se moverán de forma relativa. [Newton, 1846, p.70]

Otra forma de diferenciar al movimiento absoluto del relativo es a partir de los efectos que tienen. En lo que sigue vamos a considerar estos efectos mientras tratamos con los argumentos clásicos de Newton a favor de la existencia del espacio absoluto.

### **Los argumentos de Newton**

Newton consideraba que, si bien el espacio absoluto no puede ser conocido de forma directa (*i.e.*, no podemos conocer la posición de un objeto en él), sí podemos conocer su existencia a partir de los efectos que genera en el universo. Este tipo de efectos son los que se producen, por ejemplo, cuando una persona se siente atraída al asiendo de un vehículo cuando éste acelera. Vamos a llamar a estos fenómenos *efectos inerciales*. Así, estos efectos aparecen sobre un cuerpo cuando este se mueve en relación al espacio absoluto.

Hay dos argumentos clásicos a favor del espacio absoluto, ambos aparecen en el escolio de los *Principia* que hemos estado considerando hasta aquí. Antes de empezar con el primer argumento debo decir que hasta ahora he tratado de ser fiel



al texto original de Newton; a partir de este ahora trataré más a su postura y a sus argumentos como han sido considerados históricamente.

**El argumento de la cubeta.** Imaginemos una cubeta con agua que tiene una cuerda amarrada por encima. Supongamos una primera situación donde ambos, agua y cubeta, se encuentran en reposo relativo y donde la superficie del agua está tranquila. Si torcemos mucho la cuerda y luego la soltamos observaremos una segunda situación donde agua y cubeta están en movimiento relativo. Después de un tiempo, el movimiento de la cubeta se habrá transmitido al agua y ambos pasarán a estar, de nuevo, en reposo relativo en una tercera situación. Aunque en la primera situación y en la tercera el agua y la cubeta estén en reposo relativo hay una diferencia importante: la superficie del agua en la tercera situación tiene una cavidad (debida al movimiento) que la primera no tenía ¿Cómo podemos explicar el cambio en la superficie del agua?

Una respuesta sencilla a la pregunta que acabo de plantear sostendría que la cavidad en la superficie del agua se debe a que ésta se mueve. Pero, ¿qué tipo de movimiento tiene el agua? El tipo de movimiento que pudiera explicar a la cavidad sobre la superficie parece no poder ser movimiento relativo, pues dicho movimiento es nulo en la tercera situación de la cubeta. Newton sostiene que la cavidad se explica por el movimiento, pero no el relativo, sino el absoluto. Este movimiento, el argumento concluye, es movimiento en relación con el espacio absoluto.

**Argumento de los pesos atados.** Imaginemos un universo donde sólo hay dos pesos atados entre sí por una cuerda. Supongamos que queremos saber si los pesos están girando o no, ¿cómo podríamos saberlo? No podríamos saberlo por el

movimiento relativo de los pesos, pues ambos estarán en reposo relativo independientemente de si giran o no. Lo que sí podríamos hacer es ver si la cuerda que los une está o no tensa. Si no está tensa, entonces los pesos no están girando; si está tensa, entonces los pesos sí giran. De nuevo, para explicar la tensión en las cuerdas no podemos apelar al movimiento relativo, pues giren o no los pesos están en reposo relativo. Tampoco podemos explicar la tensión en la cuerda a partir de otros objetos en el universo, pues en nuestro caso imaginario no hay otros objetos aparte de los dos pesos. Así, el argumento concluye, la tensión de la cuerda es producida por el movimiento absoluto de los pesos y éste no es sino movimiento en relación al espacio absoluto.

Como acabamos de ver, la existencia de efectos inerciales (como los que se observan en la superficie del agua en el argumento de la cubeta o en la tensión de la cuerda en el argumento de los pesos atados) fue utilizada por Newton para generar argumentos a favor del espacio absoluto. Estos argumentos suponen que una explicación relacionista no puede dar cuenta de los efectos inerciales.

Una forma sencilla de presentar a los argumentos de Newton a favor del espacio absoluto es como argumentos de indispensabilidad. Un argumento de indispensabilidad es un argumento de la forma:  $x$  es el caso pues es indispensable para el propósito  $y$ . Viendo de este modo sus razones, los argumentos de Newton nos dicen que es indispensable suponer que el espacio absoluto existe para que podamos explicar a los fenómenos inerciales que se presentan cuando hay movimiento absoluto.

Terminamos esta sección sobre Newton con una síntesis de su postura:

*Sustancialismo de Newton:* El espacio y el tiempo absolutos existen, son inde-

pendientes de cualquier cosa en el universo y siempre se mantienen iguales. En el caso del espacio absoluto, su existencia está garantizada pues es necesaria asumirla para dar cuenta de los efectos inerciales.

### 1.1.2. Leibniz y Clarke

Durante los años de 1715 y 1716 Gottfried Wilhelm Leibniz y Samuel Clarke, un filósofo inglés partidario de las ideas de Newton, debatieron por correspondencia sobre la existencia del espacio absoluto de los *Principia*. Leibniz sostuvo que dicha idea era un elemento innecesario en la física de Newton mientras que Clarke defendió la postura de Newton. Esta discusión fue el inicio de la disputa entre los partidarios de Leibniz, relacionistas, y los de Newton, sustancialistas.

Antes de describir la postura de Leibniz y sus argumentos debo hacer una precisión. En sentido estricto, Leibniz no creía que los objetos materiales, como tampoco el espacio y el tiempo, existieran *per se*. Él creía que lo que existía en realidad eran unas entidades mentales a las que llamó *mónadas*. Aquí no estaremos interesados en esta lectura estricta de su postura. En su lugar, vamos a considerar una lectura más libre de Leibniz orientada a sus argumentos contra la existencia sólo del espacio absoluto.

Leibniz sostenía que el espacio se reducía a las relaciones espaciales de los objetos en el universo, de modo que negaba la existencia del espacio absoluto. Si recordamos las distinciones que vimos cuando consideramos los *Principia* de Newton, podemos decir que Leibniz creía que sólo existe el espacio relativo.

## Los argumentos de Leibniz

**Argumento de la identidad de los indiscernibles.** El argumento parte del principio de identidad de los indiscernibles, según el cual, no puede ser el caso que dos cosas sean distintas si éstas comparten todas sus propiedades (*i.e.*, si dos objetos comparten todas sus propiedades, entonces son el mismo objeto). Asumamos entonces este principio. El argumento de Leibniz sostiene que si el espacio existiera de forma independiente a los objetos contenidos en él y a sus relaciones espaciales, entonces un universo que estuviera desplazado a  $x$  distancia en cualquier dirección de nuestro universo, donde  $x \neq 0$ , sería distinto al nuestro. Sin embargo, continúa el argumento, esto entra en conflicto con el principio de identidad de los indiscernibles puesto que el universo desplazado a  $x$  metros del nuestro comparte todas las propiedades del actual. En breve, el argumento sostiene que el principio de identidad de los indiscernibles es incompatible con el sustancialismo de Newton.<sup>1</sup>

**Argumento del principio de razón suficiente.** El principio de razón suficiente establece que para cualquier hecho  $A$  debe haber una explicación suficiente de por qué  $A$  es el caso. Si el espacio existe con independencia a los objetos en el universo y sus relaciones espaciales, nos dice el argumento, entonces es posible que el universo pudiera haber estado ubicado a  $x$  metros de distancia de nuestro universo, donde  $x \neq 0$ . Pero, si esto es así, entonces no parece haber ninguna razón para que

---

<sup>1</sup>Una objeción sencilla a este argumento consiste en decir que sí hay propiedades distintas entre nuestro universo y el desplazado a  $x$  metros de distancia; ésta es que precisamente uno está a  $x$  metros del otro. La objeción no es irrefutable pero nos lleva a la pregunta importante para el argumento de cuáles son las propiedades de las que habla el principio de identidad de los indiscernibles.

nuestro universo esté ubicando en el lugar donde está. Por lo tanto, el sustancialismo es contrario al principio de razón suficiente.

Los argumentos de Newton y Leibniz han sido discutidos ampliamente y no es mi propósito aquí el de presentar a detalle la discusión sobre si son o no argumentos correctos.

Terminamos esta sección con una síntesis de la postura de Leibniz:

*Relacionismo de Leibniz:* No existe tal cosa como el espacio absoluto; el espacio es algo constituido por las relaciones espaciales de los objetos en el universo, por lo que depende para su existencia de que haya objetos. Los argumentos de Leibniz sostienen que el espacio absoluto es incompatible con el principio de identidad de los indiscernibles y con el principio de razón suficiente.

### 1.1.3. Comentarios finales sobre el debate clásico

Hasta aquí llegamos con la breve descripción del debate clásico entre sustancialistas y relacionistas. ¿Quién ganó? A favor de Newton puede decirse que había toda una teoría física que mostró ser asombrosamente útil para describir al universo. En su contra podemos decir, sin temor a equivocarnos, que la noción de espacio absoluto no es necesaria para su física. Tan es así, que su física puede ser aplicada en un espacio newtoniano, donde la idea de que los puntos del espacio permanecen siendo los mismos durante todo el tiempo se abandona.

Las leyes del movimiento de Newton sólo sirven en cierto tipo de sistemas de referencia, aquellos donde no actúa fuerza alguna (*i.e.*, ¡los que no están en movi-

miento absoluto!)<sup>2</sup> De esto se sigue que es necesaria la distinción entre movimiento relativo y absoluto; ¿también se sigue que el espacio absoluto existe? Newton creía que sí, que el movimiento absoluto debía ser movimiento con respecto al espacio absoluto. En realidad, lo único que nos exige la física de Newton, es poder hacer la distinción entre movimiento acelerado y no acelerado.

Sobre los argumentos de Leibniz podemos decir que hoy en día casi nadie considera seriamente al principio de razón suficiente y que pocos lo hacen con el principio de identidad de los indiscernibles. Más adelante, al final de este capítulo, trataremos con un argumento que toma algunos elementos del argumento de la identidad de los indiscernibles.

## 1.2. Relatividad especial y teoría de la relatividad general

Debido a la importancia de la teoría de la relatividad especial (TRE) y de la teoría de la relatividad general (TRG) en el debate actual entre sustancialistas y relacionistas, será necesario abordarlas a continuación. Queda de más decir que lo que sigue no es, ni de cerca, una introducción formal a las teorías. Más bien, son descripciones que mezclan historia, objetivos y principios de las teorías. Estas secciones buscan presentar algunos de los elementos dentro de la TRE y de la TRG que son importantes para el debate contemporáneo sobre el espaciotiempo.

---

<sup>2</sup>Para un sistema no inercial la física de Newton requiere la introducción de fuerzas ficticias o inerciales.

### 1.2.1. Relatividad especial

En el siglo XIX se debatió si la luz se comportaba como onda o como partícula. Como onda, muchos de sus aspectos importantes, como los colores, la difracción y la refracción, pueden ser explicados. Si la luz es una onda, entonces debería haber un medio por el que se propaga, como el agua en un estanque cuando una onda se expande. Como la luz aparentemente viaja por todo nuestro universo, entonces el medio por el que se mueve debe estar en todas partes.

A finales del siglo XIX se creyó que la luz se propagaba por un medio al que se llamó éter, se suponía que éste se encontraba en todo el universo e, incluso, se llegó a pensar que tenía corrientes similares a las de los océanos. Si la Tierra está rodeada también por el éter, resulta interesante preguntarse cuál es la velocidad de ésta con respecto a aquél. La posibilidad de poder determinar esta velocidad se garantizó con una consecuencia del electromagnetismo: la velocidad de la luz es la misma (aproximadamente 300 000 kilómetros por segundo) independientemente del sistema de referencia desde el cual se emite el haz de luz.

En 1887 Albert Abraham Michelson y Edward Morley llevaron a cabo un experimento, entre muchos otros, para determinar la velocidad de la Tierra con respecto al éter. El experimento consistió en enviar haces de luz que recorrieran la misma distancia en diferentes direcciones para luego coincidir, por medio de espejos, en un punto donde habría un dispositivo que generaría un patrón de interferencia que dependería de la velocidad de los haces de luz. A partir de las diferencias en las velocidades de los haces de luz se tendrían elementos teóricos que permitirían inferir la velocidad de la Tierra con respecto al éter.

Para entender lo que se esperaba conseguir con el experimento, imaginemos en lugar de éter la superficie de un estanque, sin corrientes; y, en lugar de haces de luz, una onda que se expande en la superficie del estanque. Si nos encontráramos en el estanque y no supiéramos si estamos en reposo con respecto a éste o no, podríamos saberlo al hacer que una onda partiera del lugar donde estamos (lo conseguiríamos con sólo golpear la superficie del agua) y luego midiéramos con qué velocidad la onda se mueve a nuestro alrededor. Si la onda viajara a la misma velocidad en toda dirección, entonces sabríamos que estamos en reposo con respecto al estanque. Si, por el contrario, la onda no viajara a la misma velocidad en toda dirección, entonces sabríamos que no estamos en reposo. Podríamos inferir la velocidad que tenemos con respecto al estanque a partir de las mediciones realizadas. Espero esto haya aclarado un poco al experimento.

Los resultados del experimento de Michelson y Morley fueron nulos. Hasta donde el experimento indicaba, ambos haces de luz parecían tener la misma velocidad sin importar la dirección en que eran lanzados. Los resultados nulos representaban un problema para la física pues indicaban que la Tierra estaba en reposo con respecto al éter, algo muy contrario a nuestra intuición.

Para solucionar el problema se propusieron varias soluciones. Una de éstas consideraba que lo que sucedía era que la Tierra arrastraba consigo una parte del éter (tesis que fue apoyada por el mismo Michelson y que fue desechada al poco tiempo por ser contraria a las observaciones que se tenían del universo). Otra solución postulaba que los objetos para medir distancias se contraían de acuerdo a la velocidad que llevaban (estas modificaciones en los instrumentos de medición eran exactas



para que las mediciones encajaran). Lorentz [1895] y Larmor [1897] desarrollaron bosquejos de las ecuaciones que describirían cómo las distancias y los tiempos se alteraban; pocos años después, presentaron las ecuaciones adecuadas [Larmor, 1900] [Lorentz, 1904].

Años más tarde, en el llamado *Annus Mirabilis* de Einstein (1905), éste publica *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, texto que solucionó de forma convincente el problema planteado por el experimento de Michelson y Morley. El objetivo del texto de Einstein era restaurar al *principio de relatividad para sistemas de referencia inerciales* (en adelante principio de relatividad restringido) dentro de la electrodinámica [Einstein, 1905]. Este principio (comúnmente atribuido a Galileo) establece que las leyes de la física son las mismas para cualquier sistema de referencia inercial. Antes de 1905, la electrodinámica asumía la existencia del éter y, con él, la existencia de un sistema de referencia privilegiado (aquel en reposo con respecto al éter). El postulado del éter entraba en conflicto con el principio de relatividad restringido, según Einstein, puesto que sostenía que la velocidad de la luz (300 000km/s, aproximadamente) sólo era válida para sistemas de referencia que estuvieran en reposo con respecto al éter.

El texto de Einstein concilia la electrodinámica con el principio de relatividad restringido a partir de dos postulados; primero, el principio de relatividad restringido, el cual establece, como ya vimos, que las leyes de la física son iguales para cualquier sistema de referencia inercial; segundo, que la velocidad de la luz es la misma para cualquier sistema de referencia inercial, *i.e.*, su velocidad es independiente del estado de movimiento desde el cual se realiza la medición (juntos, los

principios son la teoría de la relatividad especial). El segundo postulado de Einstein hace de los resultados de Michelson y Morley una ley: la experiencia indicaba que la velocidad de luz no cambiaba por la velocidad que llevaran diferentes observadores y esto, a los ojos de Einstein, era una ley.

Arriba vimos que una de las soluciones propuestas para explicar los resultados nulos del experimento de Michelson y Morley consistía en decir que los objetos de medición se contraían al estar en movimiento. Esta solución, en especial las ecuaciones de Lorentz que explicaban las contracciones, y la propuesta de Einstein guardan una estrecha relación. Los postulados de Einstein pueden entenderse como una forma de explicar a las ecuaciones de Lorentz. Éste había interpretado a sus ecuaciones de modo que hablaban de las transformaciones de un estado privilegiado de referencia a otro no privilegiado, mientras que Einstein las interpretó a partir de una nueva concepción del espacio y el tiempo que se derivaba de los dos postulados de su teoría.

Lo que proponía Einstein era considerar que los sistemas de referencia inerciales están relacionados por transformaciones regidas por las ecuaciones de Lorentz: las transformaciones de Lorentz. Dado un sistema de referencia con tres coordenadas espaciales  $(x, y, z)$  y una temporal  $t$  y un segundo sistema de referencia moviéndose a la velocidad  $v$  en la dirección  $x$  con coordenadas  $(\xi, \eta, \zeta)$  y la coordenada temporal  $\tau$ , entonces bajo las transformaciones de Lorentz:

$$\xi = \gamma(x - vt) \quad \tau = \gamma(t - vx/c^2) \quad \eta = y \quad \zeta = z$$

donde  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  es el factor de Lorentz y  $c$  la velocidad de la luz. Antes de

1905, la mecánica asumía las transformaciones de Galileo:

$$\xi = x - vt \quad \tau = t \quad \eta = y \quad \zeta = z$$

¿Qué tiene que ver esto con los postulados de la relatividad especial? En primer lugar, el principio de relatividad restringido ahora debía ser aplicado a partir de las transformaciones de Lorentz, *i.e.*, las leyes de la física debían ser las mismas para diferentes sistemas de referencia inerciales cuando se les aplicaba las transformaciones de Lorentz (cosa que antes se hacía a partir de las transformaciones de Galileo). En segundo lugar, al cambiar las transformaciones de Galileo por las de Lorentz se garantizaba el segundo postulado de la relatividad especial: la constancia de la velocidad de la luz. En efecto, una consecuencia de asumir a la transformación de Galileo dentro de la electrodinámica era tener que negar a la constancia de la velocidad de la luz; con las transformaciones de Lorentz la velocidad de la luz se mantenía constante.

Una implicación importante de la relatividad especial es que el conjunto de eventos considerados simultáneos puede variar para dos sistemas de referencia distintos. Para un observador en un sistema de referencia inercial dos eventos podrían estar ocurriendo al mismo tiempo mientras que para otro, en un sistema distinto, no. En otras palabras, el tiempo según la relatividad especial varía dependiendo del sistema de referencia desde donde se mida.

Einstein mostró que las leyes de la electrodinámica no cambiaban al aplicárseles las transformaciones de Lorentz, mostrando de este modo la compatibilidad entre la electrodinámica y el principio de relatividad restringido. Con la relatividad especial, la electrodinámica no tenía por qué elegir más un sistema de referencia privilegiado

y, por lo tanto, el postulado del éter perdía cualquier significación física. Con el ejemplo de la electrodinámica, la tarea de generar versiones de teorías físicas acordes al principio de relatividad restringido se reducía a formular sus leyes de manera que permanecieran sin cambio a partir de las transformaciones de Lorentz.

Podemos resumir las ideas de la teoría de la relatividad de forma simple: para generar una teoría que sea congruente con el principio de relatividad restringido es suficiente asegurar que sus leyes puedan ser las mismas a partir de las transformaciones de Lorentz. Así, la covarianza de Lorentz pasó a ser sinónimo de satisfacción del principio de relatividad para sistemas de referencia inerciales.

### **El espaciotiempo de Minkowski**

En el trabajo de Einstein las transformaciones de Lorentz eran sólo una propiedad algebraica: coordenadas espaciales y temporales cambiaban de un sistema a otro de acuerdo a las transformaciones de Lorentz y esto permitía que las leyes de la electrodinámica, en particular, y de la física, en general, fueran las mismas para todo sistema de referencia inercial. Poco tiempo después, Herman Minkowski interpretó el trabajo de Einstein de un modo geométrico unificando, de paso, los conceptos de espacio y tiempo.

El trabajo de Minkowski estuvo influenciado por las modificaciones que la geometría había experimentado en su época. A finales del siglo XIX la geometría sufrió grandes cambios debido a la aparición de geometrías no euclidianas. Ante éstas, la idea intuitiva de la geometría como una disciplina que estudiaba puntos, rectas y otras figuras no parecía apropiada (hecho que puede apreciarse al considerar que los métodos analíticos y algebraicos aumentaron su uso dentro del estudio de la geo-

metría). En 1872, Felix Klein propuso un programa de investigación, hoy recordado como *Erlangen* (lleva ese nombre debido a que Klein estaba en Erlangen en ese momento), que involucraba una nueva definición de la geometría. Según éste, la geometría es el estudio de ciertas propiedades que no cambian al aplicárseles cierto tipo de transformaciones. Las propiedades, por no cambiar, son llamadas invariantes y son el objeto de estudio de la geometría. Así, la geometría de Euclides, por ejemplo, es el estudio de las propiedades invariantes del conjunto de transformaciones de los movimientos rígidos (reflexiones, rotaciones y traslaciones). Un ejemplo sencillo de invariante bajo estas transformaciones es el ángulo de un triángulo cuando a éste se le rota en una superficie plana: el ángulo sigue siendo el mismo aunque el triángulo se haya rotado.

Minkowski consideraba que la geometría había estado demasiado concentrada en las transformaciones de tipo espacial, ignorando de esta forma algunas transformaciones asociadas con la mecánica, en particular con las relacionadas con sistemas de referencia inerciales. Minkowski trató al grupo de transformaciones de los sistemas de referencia inerciales como a cualquier tipo de transformaciones geométricas; en particular, construyó la geometría asociada a las transformaciones de Lorentz. La nueva geometría a la que llegó ya no trataba con un espacio, sino con lo que después se llamó *espaciotiempo de Minkowski*. Este espaciotiempo es el lugar donde los eventos de la relatividad especial tienen lugar.

Puede ilustrarse la novedad de las ideas de Einstein, hechas geometría gracias a Minkowski, a partir de las primeras líneas de un discurso famoso que dio Minkowski en 1909:

Gentlemen! The conceptions about time and space, which I would like to develop before you today, have grown on experimental physical grounds. Herein lies their strength. Their tendency is radical. Henceforth, space for itself, and time for itself shall completely reduce to a mere shadow, and only some sort of union of the two shall preserve independence. [Minkowski, 1909]

### 1.2.2. Teoría de la relatividad general

La TRE solucionó los problemas planteados por los experimentos de Michelson y Morley dejando a la electrodinámica sin cambios y reivindicando al principio de relatividad restringido. La nueva teoría de Einstein, sin embargo, traía consigo nuevos problemas pues era incompatible con la física de Newton. En ésta, por ejemplo, las interacciones gravitatorias son instantáneas (*i.e.*, si una masa enorme apareciera entre la Tierra y el astro más lejano a ésta, la interacción gravitatoria entre la nueva masa y la Tierra sería instantánea), mientras que para TRE nada puede viajar más rápido que la luz. Esta tensión hacía clara la necesidad de una nueva teoría que diera cuenta de la gravedad.

En 1907, Einstein da sus primeros pasos en la búsqueda de una nueva teoría al preguntarse por la posibilidad de expandir el principio de relatividad. El principio de relatividad restringido establece, como vimos en 1.2.1, que las leyes de la física deben tener la misma forma para los sistemas de referencia inerciales. Así, lo que Einstein se pregunta en 1907 es si las leyes de la naturaleza pueden ser las mismas

no sólo para los sistemas de referencia inerciales, sino para cualquier sistema de referencia.

En su búsqueda por expandir el principio de relatividad a sistemas no inerciales, Einstein primero se preguntó por la posibilidad de hacerlo con respecto a sistemas con aceleración rectilínea uniforme [Einstein, 1907]. ¿Qué dificultades tiene hacer que el principio sea aplicable a sistemas no inerciales? Imaginemos a una persona haciendo malabares con pelotas mientras se encuentra en un tren que está en reposo con respecto a una estación. Si la misma persona, después de partir el tren y de que éste haya alcanzado una velocidad constante (*i.e.*, se haya convertido otra vez en un sistema de referencia inercial) quisiera volver a hacer malabares podría hacerlo con la misma facilidad que cuando el tren se encontraba en reposo con la estación. Si de pronto el tren acelerara o frenara, sin embargo, nuestro malabarista encontraría mucho más difícil seguir haciendo malabares con las pelotas. El comportamiento mecánico de los objetos dentro del tren parece cambiar cuando éste acelera o frena. Así, parece intuitivo suponer que las leyes que rigen a la mecánica del tren en reposo con respecto a la estación son distintas a las que lo rigen cuando éste acelera.

### **Principio de equivalencia**

La idea básica para solucionar el problema que acabamos de plantear y, quizá, la idea más importante dentro de la teoría de la relatividad general es lo que él llamó hipótesis de equivalencia [Einstein, 1912a] o principio de equivalencia [Einstein, 1912b].

Una forma de representar la gravedad es a partir de un campo gravitatorio, el cual es una propiedad de una región que está alrededor de una masa  $M$  y que adquiere ciertas características que dependen de la presencia de  $M$ . Una propiedad

peculiar de este campo, que ya había sido advertida por Galileo, consiste en que la aceleración que produce en los cuerpos sobre los que actúa no depende de la masa que éstos tengan. Si tomamos dos objetos, por ejemplo, uno de plomo y otro de papel, y los dejamos caer, estando en la superficie de la Tierra, veremos que ambos caen al mismo tiempo (si ignoramos a la fricción). A este fenómeno se le conoce como universalidad de la caída libre.

Este fenómeno visto desde la física de Newton nos lleva a una idea que tuvo mucho peso en el desarrollo de la TRG:

La segunda ley de Newton nos dice que cuando aplicamos una fuerza ( $F$ ) a un cuerpo con masa inercial  $M_i$ , éste tendrá una aceleración  $a$ :

$$F = m_i a$$

Si queremos medir la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos, tenemos, por la ley de gravitación de Newton que:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Si lo que nos interesa es la fuerza gravitatoria entre un cuerpo  $m_g$  y la Tierra  $m_T$  tenemos:

$$F = G \frac{m_g m_T}{r^2}$$

Donde  $m_g$  es la masa del cuerpo,  $m_T$  la masa de la Tierra,  $r$  es la distancia entre las masas (en este caso el radio de la Tierra) y  $G$  es la constante de gravitación universal.

Ahora, si quisiéramos medir la aceleración que produce la fuerza de gravedad



sobre  $m_g$ , entonces igualaríamos:

$$M_i a = G \frac{m_g m_T}{r^2}$$

Es decir,

$$a = \frac{M_g}{M_i} G \frac{M_T}{r^2}$$

Midiendo la aceleración  $a$ , producida por la gravedad, de un objeto en muchos experimentos, hasta la fecha, tenemos que siempre es igual, de forma independiente a la masa que tenga. De esto se concluye que  $\frac{M_g}{M_i} = 1$  Es decir, la igualdad de la masa gravitatoria a la masa inercial.

La igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria era algo conocido desde antes de Einstein. Sin embargo, él tomó este hecho como algo que no era casual y lo utilizó en sus reflexiones para la génesis de la TRG. Dentro de la física de Newton, la igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria era algo contingente.

Imaginemos una región de espacio donde sólo hay una habitación con una persona dentro. En el techo de la habitación, por fuera, hay una sogá sujeta a un gancho. Imaginemos que una fuerza, cuya naturaleza no nos importa, tira de la sogá y hace que la habitación, junto con todo lo que está dentro, acelere. Descrito desde fuera lo que sucede es simple: hay una fuerza que, al tirar de una sogá, acelera a la habitación. ¿Qué descripción podría dar la persona que está dentro? El suelo donde está parada le transmite la aceleración de la habitación y, por lo tanto, si esa persona quiere evitar caer entonces debe contrarrestar a la fuerza que produce la aceleración con sus piernas. Esto es, la persona estaría de pie, igual que en una habitación en la superficie de la Tierra.

Con la intención de conocer su situación, el sujeto de la habitación podría hacer

experimentos dejando caer al mismo tiempo objetos de masas distintas para luego ver que ambos caen al mismo tiempo. La persona de la habitación podría concluir, a partir de su experiencia con el campo gravitatorio de la Tierra, que se encuentra en un lugar sobre el cual un campo gravitatorio está actuando.

Lo importante de la interpretación del sujeto de la habitación consiste en que se trata de una descripción apropiada, dado su desconocimiento de lo que sucede fuera del cuarto, de su situación.

Como ya mencionamos, en 1907 Einstein se pregunta por la posibilidad de expandir el principio de relatividad restringido. El problema obvio con esto estaba en que los estados acelerados, como los del ejemplo del malabarista en el tren, generan fuerzas que se manifiestan en el comportamiento mecánico de los cuerpos en él. Pareciera entonces imposible que las mismas leyes fueran válidas para sistemas inerciales y no inerciales. El principio de equivalencia es la clave para solucionar esto pues muestra que un observador en un sistema acelerado (el sujeto del ejemplo de la habitación en el espacio) puede interpretar a las fuerzas que experimenta como causadas por un campo gravitatorio.

### 1.2.3. La solución de Einstein

La teoría de la relatividad general (TRG) es una teoría que describe a la gravedad como a una propiedad del espaciotiempo y establece cómo ésta interactúa con la masa en el espaciotiempo. Esta descripción nos exige explicar dos cosas; primero, qué significa que la gravedad sea una *propiedad del espaciotiempo*; segundo, qué interacción es la que la TRG propone entre materia y gravedad.

### Curvatura del espaciotiempo

Regresemos al caso imaginario de la habitación en el espacio. Supongamos, de nuevo, que ésta está siendo acelerada por una fuerza desconocida. Consideremos el caso donde una de las paredes de la habitación tiene un agujero y donde por él entra una canica, ¿cómo describiría la trayectoria de la pelota nuestro observador? Como el cuarto está acelerando, la trayectoria de la pelota sería la de una curva. De igual modo, si por el agujero entrara un haz de luz, la descripción de la trayectoria también sería curva.

Si la habitación no estuviera acelerando sino que se encontrara bajo el efecto de un campo gravitatorio, como nuestro observador supone, ¿qué vería cuando un haz de luz entrase por el agujero? El principio de equivalencia nos dice que en este caso también la persona vería al haz de luz seguir una trayectoria curva.

Suponemos que una característica de la luz es que ésta siempre se mueve siguiendo trayectorias lo más cortas posibles (geodésicas). Si estamos en un espacio de tres dimensiones plano y lanzamos un haz de luz de un punto  $x$  a uno  $y$ , la trayectoria que seguirá, por ser la más corta, será la de una línea recta. Supongamos ahora el caso de un plano curvo de dos dimensiones (como la superficie de una pelota) y a un haz de luz que es lanzado en dicho plano (para que el ejemplo corra supongamos que dentro de la superficie viven sujetos de dos dimensiones con luces también de dos dimensiones). La trayectoria más corta, aquella que seguirá el haz de luz, no podría ser una línea recta, pues en la superficie que estamos considerando no hay líneas rectas. En su lugar, el haz de luz trazará una trayectoria lo más parecida a

una línea recta. La razón por la cual el haz de luz seguiría dicha trayectoria yace en la curvatura del plano que estamos considerando.

Regresemos al caso de la habitación en el espacio. Si la luz siempre sigue geodésicas, entonces que la trayectoria del haz de luz sea curva cuando la habitación está bajo la influencia de un campo gravitatorio significa que el espaciotiempo por el que se desplaza es curvo.

### **Relación entre gravedad y espaciotiempo**

Las ecuaciones de Einstein, el núcleo de la TRG, describen a la relación entre la materia y el espaciotiempo. Estas ecuaciones están formadas por los siguientes elementos:

- i. *Una variedad  $M$* : es un espacio topológico que a pequeña escala se parece a un espacio euclidiano de una dimensión específica. En TRG, la variedad es de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal).
- ii. *Campo métrico  $g$* : es un campo definido sobre la variedad que establece las nociones de longitud, ángulo, volumen y a las relaciones temporales dentro de la misma.
- iii. *Campo de energía-impulso  $T$* : es un campo que describe al flujo de energía y la densidad del momentum de una distribución continua de materia. La materia es representada por este campo.

Con estos como sus elementos, las ecuaciones de Einstein describen cómo el espaciotiempo se curva en presencia de la materia y cómo es que ésta es modificada por el espaciotiempo:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Donde  $G_{\mu\nu}$  es el tensor de curvatura de Einstein (formado a partir del campo métrico),  $T_{\mu\nu}$  el campo de energía momentum,  $c$  la velocidad de la luz y  $G$  la constante de gravitación universal.

### 1.3. Argumento del agujero

En 1913, antes de llegar a las ecuaciones de la TRG, Einstein creyó haberse encontrado con un problema que minaba cualquier intento por hallar a una teoría que satisficiera al principio de relatividad (según el cual, las leyes de la naturaleza son las mismas para todo sistema de referencia). El problema consistía en que una teoría que lo hiciera parecía atentar contra el determinismo (al cual él llamaba ley de la causalidad). La razón que presentó Einstein para mostrar este problema es conocida como el *argumento del agujero*. Éste supone un espaciotiempo lleno de materia excepto en una región (el agujero) y luego se pregunta si la especificación total de los campos métrico y de energía-momentum fuera del agujero sería suficiente para determinar un único campo métrico dentro del mismo. Einstein interpretó a la respuesta negativa a esta pregunta como una falla del determinismo de la teoría pues asumió, de forma tácita, que especificaciones del campo métrico distintas representan a situaciones físicas diferentes.

El argumento del agujero disuadió a Einstein durante dos años de proseguir en su búsqueda de la TRG. Para 1915 la pausa termina y en ese mismo año da con las ecuaciones de campo de la TRG. Einstein hizo explícitas las razones que lo

motivaron a abandonar el argumento del agujero hasta 1916. John Stachel llamó a dichas razones *the point-coincidence argument*. El argumento es una defensa de la idea de que el contenido de una teoría física se agota en las descripciones físicas que pueden constatarse. Así, distribuciones distintas del campo métrico, como las presentes en el argumento del agujero, no significan nada si no cambian el contenido constatable de la teoría.<sup>3</sup>

El argumento del agujero fue considerado un episodio trivial en el desarrollo de la TRG por muchos años. Fue Stachel [1980] quien revivió su importancia dentro de la filosofía y la historia de la física. Poco tiempo después, Earman and Norton [1987] revivieron al argumento en el contexto del debate entre sustancialistas y relacionistas. En su nueva versión, es un argumento en contra de ciertos tipos de sustancialismo. Más adelante describiré al argumento en su forma actual.

#### 1.3.1. Covarianza general

Con la TRG, Einstein logró una teoría que es covariante de forma general. La covarianza general puede ser descrita como la libertad que tenemos en una teoría de describir a un mismo fenómeno desde distintos sistemas de referencia. Hay dos formas de entender a esta libertad, igualmente válidas, que nos permite la TRG:

**Libertad pasiva:** Las leyes mantienen su forma para distintos sistemas de referencia. Como resultado, tenemos la libertad de usar cualquier sistema de coordenadas que elijamos para describir a un mismo fenómeno.

---

<sup>3</sup>*The point-coincidence argument* es un poco más complejo pues en lugar de hablar del contenido constatable de una teoría habla de coincidencias espaciotemporales (de ahí su nombre) y nunca aclara exactamente qué son estas [Einstein, 1916].

**Libertad activa:** Además de la libertad de elegir sistemas de coordenadas, también podemos distribuir a los campos de energía-momentum y métrico de tantas formas como sistemas de coordenadas haya. Esto es, podemos tomar a las estructuras geométricas que yacen en un punto  $x, y, z, t$  y trasladarlas al punto  $x_1, y_1, z_1, t_1$ .

### 1.3.2. Transformación de agujero

El argumento del agujero utiliza la libertad activa de la covarianza general al emplear una *transformación de agujero*. Una transformación de agujero es una transformación entre dos distribuciones de campos tal que:

1. los campos no cambian fuera de una región (el agujero).
2. dentro del agujero están distribuidos de forma distinta.
3. las distribuciones dentro y fuera del agujero se juntan de forma suave.

¿Dos distribuciones de campos,  $M$  y  $M'$ , unidas por una transformación de agujero representan la misma situación física?

En *What Price Spacetime Substantivalism*, Earman y Norton argumentan que si el sustancialismo es el caso, entonces dos distribuciones de campos unidas por una transformación de agujero no representan la misma situación física. Para sostener esa idea asumieron que el sustancialismo debe necesariamente negar el siguiente principio:

**Equivalencia de Leibniz:** Si dos distribuciones de campos están relacionadas por una transformación de agujero, entonces representan al mismo sistema físico.

La suposición de Earman y Norton de que el sustancialismo debe, necesariamente, negar este principio es muy fuerte. De hecho, como veremos más adelante, hay razones para creer que alguien puede ser sustancialista sin negar la equivalencia de Leibniz.

### 1.3.3. Consecuencias indeseables

Si es cierto que los sustancialistas deben tratar a diferentes distribuciones de campos siempre como representaciones de distintos sistemas físicos, entonces el sustancialista está obligado a concluir que en una transformación de agujero,  $M \rightarrow M'$ ,  $M$  y  $M'$  son representaciones de sistemas físicos distintos. Earman y Norton le ven dos consecuencias negativas a esto:

- Fallo de la verificación observacional: dos distribuciones de campos relacionadas por una transformación de agujero son, en términos observacionales, equivalentes. Sin embargo, el sustancialista al negar la equivalencia de Leibniz sostiene que, aunque no hay diferencia física entre las dos distribuciones de campos, éstas representan a diferentes situaciones físicas.
- Indeterminismo: al negar la equivalencia de Leibniz, el sustancialista está obligado a concluir que la relatividad general es una teoría indeterminista. Tanto  $M$  como  $M'$  son distribuciones de campos que satisfacen todas las leyes de la TRG y, por lo tanto, no tenemos cómo elegir entre una u otra. Como no podemos elegir, entonces no sabemos cuál usar para decir qué sucederá en el futuro del sistema físico descrito.





## Capítulo 2

# Sustancialismo de campo métrico

Ha habido múltiples respuestas al argumento del agujero por parte de quienes consideran al espaciotiempo como una sustancia en la TRG. En este capítulo consideraremos algunas de estas respuestas, deteniéndonos especialmente en una que fue formulada en años recientes y es popular, el sustancialismo de campo métrico. El principal objetivo de este capítulo es presentar dos formas de este tipo de sustancialismo de campo métrico y argumentar que sólo una de ellas es viable. La diferencia entre estos dos tipos de sustancialismo de campo métrico reside en el estatus que le otorgan al campo métrico.

### 2.1. Respuestas al argumento del agujero

Como vimos al final del capítulo anterior, el argumento del agujero descansa fuertemente en la suposición de que el sustancialismo debe necesariamente negar la equivalencia de Leibniz. Earman y Norton no ofrecieron argumentos claros a favor de esta postura; en su lugar, sostuvieron que es una consecuencia del hecho de

que los sustancialistas deben responder de forma positiva a la pregunta, planteada originalmente por Leibniz, ‘¿es un universo desplazado a tres metros de distancia del nuestro un universo distinto al nuestro?’ [Earman and Norton, 1987, 521]. Aunque no conozco argumentos a favor de esta afirmación, claramente a personajes como Clarke y Leibniz les pareció una postura sensata. Dentro del grupo de sustancialistas que responden al argumento del agujero hay quienes coinciden con esta intuición, otra vez, la intuición de que el sustancialismo debe negar la equivalencia de Leibniz, y responden sin negarla; hay, por otra parte, sustancialistas que evaden el argumento del agujero negando que el sustancialismo esté obligado a negar la equivalencia de Leibniz. En lo que sigue consideraremos dos respuestas sustancialistas que admiten que hay un compromiso por parte del sustancialista con la negación de la equivalencia de Leibniz.

La primera de estas respuestas la encontramos en Maudlin [1988]. Ahí Maudlin propone, en lo que llama *esencialismo de métrica*, que las propiedades métricas de los puntos espaciotemporales actuales son propiedades esenciales a éstos [Maudlin, 1988, 86]. Si esto es así, entonces a lo mucho uno de los modelos difeomorfos de una teoría del espaciotiempo asigna las propiedades métricas correctas a los puntos espaciotemporales, de modo que a lo mucho un modelo representará una situación física posible.

El esencialismo de métrica escapa del indeterminismo señalado por el argumento del agujero al sostener que a lo mucho uno de los modelos relacionados por una transformación de agujero es el que describe a un universo posible. Así, el determinismo en la TRG está garantizado pues dentro de todo el conjunto de modelos conectados

por una transformación de agujero, a lo mucho uno determinará, realmente, cómo las distribuciones de campos se comportan a futuro.

Carolyn Brighthouse presenta en *Spacetime and holes* un argumento en contra del esencialismo de métrica. El argumento se basa en que dicho esencialismo hace falsos ciertos contrafácticos, por ejemplo: es claro que si el sol tuviera más masa de la que ahora tiene, entonces la curvatura alrededor de él habría sido diferente; empero, este contrafáctico sería falso si tomamos a las propiedades métricas de los puntos espaciotemporales como propiedades esenciales de éstos [Brighthouse, 1994, 119].

El esencialista de métrica podría dar respuesta a la objeción anterior incorporando alguna forma de la teoría de las contrapartes a su propuesta. De este modo, podría tratar a los puntos espaciotemporales de casos contrafácticos, como los del ejemplo del sol, como contrapartes de los puntos espaciotemporales ‘reales’. Además, el esencialista de métrica negaría la identidad transmudana de los puntos involucrados para garantizar su tesis de que a lo mucho un modelo representa una situación física posible.

Al integrar a la teoría de las contrapartes a su propuesta, el esencialismo de métrica pierde algo de atractivo y parece más una postura *ad hoc*. En su lugar, podemos considerar a la teoría de las contrapartes como base para una respuesta al argumento del agujero.

Jeremy Butterfield, en *Albert Einstein meets David Lewis* y en *The Hole Truth*, da una respuesta al argumento del agujero basada en la teoría de las contrapartes. Al igual que Maudlin, Butterfield sostiene que a lo mucho uno de un par de modelos de la TRG unidos por una transformación de agujero representa un mundo posi-

ble, pero considera que en lugar de hablar de propiedades esenciales de los puntos espaciotemporales es mejor apelar a la negación de la identidad transmunda [Butterfield, 1988, 66]. Para Butterfield, las propiedades determinadas por los campos determinan las relaciones de contraparte para los puntos del espaciotiempo. Así, su postura puede dar cuenta de los contrafácticos que generaban conflictos para el esencialismo métrico.

Brighouse, en el artículo al que hice referencia anteriormente, presenta una objeción a la postura de Butterfield que me parece apropiada. Butterfield pretende establecer, a partir de la negación de la identidad transmunda, que a lo mucho uno de los modelos relacionados por una transformación de agujero representa una situación física posible. No obstante, no es claro cómo es que esto se consigue pues, como señala Brighouse, aspectos sobre identidad transmunda son aspectos acerca de mundos posibles, y no de modelos que pretenden representar dichos mundos [Brighouse, 1994, 120]. Butterfield afirma que es una condición necesaria para que un modelo represente una situación física posible que el conjunto de puntos de la variedad de dicho modelo consista en puntos del espaciotiempo. Sin embargo, esto no parece dejar claro cómo es que la negación de la identidad transmunda nos lleva a la afirmación de que a lo mucho un modelo representa una situación física posible. Lo que necesita Butterfield es una afirmación más fuerte, y muy sospechosa, según la cual un modelo puede representar un mundo sólo si su variedad consiste completamente de puntos espaciotemporales de ese mundo.

John Norton, en *The Hole Argument*, presenta una objeción en contra de las posturas de Maudlin y Butterfield. La tesis central de ambas posturas consiste en

que, para dos modelos difeomorfos, a lo mucho uno representa una situación física posible. Dado el caso en que uno de ellos representa una situación física, ¿cómo distinguimos al modelo real del impostor? [Norton, 1988, 63]. Debería haber una propiedad físicamente significativa que nos permita distinguir entre el modelo correcto y los espurios. Sin embargo, como los modelos son difeomorfos, esta propiedad no puede tener consecuencias físicas.

## 2.2. Antihaecceitism

Una respuesta al argumento del agujero que merece especialmente nuestra atención es el llamado *sustancialismo sofisticado* [Pooley, 2012, 59] o *sustancialismo de campo métrico* [Hofer, 1996, 6] [Cala, 2006, 139].<sup>1</sup> La importancia de esta respuesta radica en su aparente simpleza y en la popularidad que posee.<sup>2</sup>

La característica más importante del sustancialismo de campo métrico es la negación del *haecceitism*, la visión de que puede haber identidades puras a través de mundos posibles en el sentido de identidades que no supervienen de propiedades cualitativas. En el contexto de la discusión sobre el estatus del espaciotiempo, este *antihaecceitism* significa la negación general de distinciones no cualitativas entre mundos posibles [Pooley, 2012, 59]. A partir de esta visión, el sustancialista está en

---

<sup>1</sup>En lo sucesivo me referiré a esta postura como sustancialismo de campo métrico.

<sup>2</sup>Véase Pooley [2012], Hofer [1996] y Brighouse [1994]. Norton [2011] presenta a las respuestas sustancialistas al argumento del agujero de Hofer [1996] y Brighouse [1994] como respuestas distintas. Pese a que las respuestas tienen ligeras diferencias, creo que ambas son en esencia la misma. Lo que nos permite caracterizarlas de este modo es el hecho de que ambas adoptan una forma de *antihaecceitism*.

posición de aceptar la equivalencia de Leibniz, la cual, según Earman y Norton, debía ser negada por cualquier forma de sustancialismo. Como el argumento del agujero es en realidad un argumento en contra de cualquier postura que niegue la equivalencia de Leibniz, el sustancialista puede escapar del mismo al adoptar el *antihaeccetism*.

Un primer problema con la adopción del *antihaeccetism* por parte del sustancialista está en que hay dificultades para definir lo que éste y su negación son.<sup>3</sup> Tal vez por esta razón tanto Hofer como Brighouse y Pooley no dan una definición clara de lo es el *antihaeccetism* sino que presentan ejemplos. En el caso de Hofer [1996], se presenta un ejemplo con dados. Supongamos que tenemos dos dados y los llamamos *A* y *B* al señalarlos. Ahora preguntamos: ¿tiene sentido preguntar si el dado *A* pudo haber estado donde el dado *B* está con todas las propiedades actuales de *B*, y el dado *B* localizado donde *A* está con todas las propiedades de *A*? [Hofer, 1996, 14] Una persona que adopta el *antihaeccetism* debe responder de forma negativa a la anterior pregunta, *i. e.*, debe decir que no tiene sentido. Nótese que la pregunta no es si es posible que los dados *A* y *B* cambien de lugar, sino si la pregunta tiene *sentido*.<sup>4</sup>

*Prima facie*, las dificultades para definir al *antihaeccetism*, aunque son un asunto importante para el sustancialista que quiere adoptarlo, no son suficientes para hacer a esta respuesta al argumento del agujero incorrecta. Esto se debe a que el sustancialista sólo está comprometido con la tesis de que no puede hablarse del mis-

---

<sup>3</sup>Véase Skow [2008].

<sup>4</sup>Hofer no adopta al *antihaeccetism* de forma directa. En su lugar, argumenta a favor de lo que él llama la *negación de la identidad primitiva para puntos espaciotemporales* y luego relaciona a su postura con el *antihaeccetism* [Hofer, 1996, 14-16]. Interpreto a la negación de la identidad primitiva para puntos espaciotemporales, adoptada por Hofer, como una forma de *antihaeccetism* sólo de los puntos espaciotemporales.

mo punto espaciotemporal sin hacer alusión a sus propiedades cualitativas, lo cual es suficiente para asegurar que su sustancialismo es consistente con la equivalencia de Leibniz.

El sustancialismo de campo métrico da solución al argumento del agujero al hacer compatible la equivalencia de Leibniz con el sustancialismo. Esto lo consigue al sostener que todo punto espaciotemporal de una variedad es individuado a partir de las cualidades que posee. Por propiedades de los puntos de una variedad los sustancialistas de campo métrico piensan en las propiedades que determina el campo métrico.

¿Cuál es la relación entre las propiedades que asigna el campo métrico distribuido sobre una variedad y los puntos de ésta? Diferentes respuestas a esta pregunta dan lugar a distintas formas de sustancialismo de campo métrico. Básicamente, las respuestas de los sustancialistas han sido dos. O bien la variedad más el campo métrico representan al espaciotiempo o bien el espaciotiempo es sólo la variedad pero sus propiedades son determinadas por el campo métrico. En lo que sigue vamos a considerar la primera de estas opciones y argumentaré que es una opción problemática para el sustancialista.

### **2.2.1. Métrica material**

Hofer [1996] sostiene que el espaciotiempo en la TRG es representado por la variedad más el campo métrico; al sostener esto, Hofer también responde a la cuestión que planteamos al final de la sección anterior, ¿cuál es la relación entre los puntos espaciotemporales y las propiedades de las distribuciones de campos?, la relación



está en que tanto la variedad como el campo métrico representan a una misma entidad, el espaciotiempo.

Earman y Norton [1987] argumentaron que sólo la variedad  $M$  en la TRG representa al espaciotiempo. Los autores ofrecieron dos razones. La primera apela a que la estructura geométrica, el campo métrico, es claramente un campo físico. El tensor métrico contiene al campo gravitatorio y, por lo tanto, contiene energía y momento, cuya densidad es representada por el pseudo-tensor de energía impulso del campo gravitatorio. Si se considera que estructuras que contienen energía, como el campo gravitatorio, forman parte del espaciotiempo, entonces ‘we do not see how we can consistently divide between container and contained’ (519). La segunda razón apela a que considerar a la métrica como parte del espaciotiempo lleva a la trivialización del sustancialismo en teorías del campo unificado del tipo desarrollado por Einstein, donde toda la materia es representada por un tensor métrico generalizado; esto dado que no habría nada contenido en el espaciotiempo [Earman and Norton, 1987, 519].

Maudlin ha ofrecido un razón para creer que Earman y Norton se equivocan al identificar al espaciotiempo con la variedad en la TRG. Él apunta a que la variedad por sí sola sólo posee un mínimo de propiedades espaciotemporales: la dimensionalidad y la topología.

*Prima facie* it [sostener que el espaciotiempo se reduce a la variedad] seems like a peculiar position to hold. The substantialist is interested in ascribing full ontological status to space-time. But just qua differentiable manifold, abstracting from the metrical structure, space-time has none of the paradigm spatio-temporal properties. The light-cone structure is not defined; past and future cannot be distinguished; distance relations do not exist. Spatio-

temporal structure is metrical structure, and the substantivalist will certainly insist that space-time have spatio-temporal structure [Maudlin, 1988, 87].

Hofer reproduce esta cita en su texto de 1996 y añade dos comentarios. El primero aparece en una nota al pie de página donde señala que es demasiado fuerte decir que la variedad no tiene ninguna de las propiedades paradigmáticas del espaciotiempo, pues las relaciones topológicas de cercanía son propiedades espaciotemporales importantes. El segundo comentario señala que el espaciotiempo como variedad hace al espaciotiempo un extraño sucesor del espacio absoluto de Newton; sin embargo, ya habíamos tenido que aceptar, por TRE y TRG, que el espacio y el tiempo son diferentes a como Newton los había pensado. Así, que resulte extraño que el espaciotiempo sea representado por una variedad en la TRG no parece ser un argumento contundente contra considerar al espaciotiempo sólo como variedad [Hofer, 1996, 12].

No obstante, Hofer añade, considerar el papel del campo métrico en la TRG parece traer implicaciones importantes. En los cimientos del sustancialismo está la idea de que el espaciotiempo es útil para explicar una serie de fenómenos físicos (como la aceleración en el caso del espacio absoluto de Newton). En el caso de la TRG, todo el trabajo de explicativo en este sentido es realizado por el campo métrico y no por la variedad que no contiene campos. Además, la TRG no tiene modelos donde haya una variedad sin campos en ella, pero sí donde, claramente, no hay materia.

Me parece que el argumento de Maudlin y Hofer es muy atractivo, aunque carece de fuerza. Que dos objetos cumplan con los mismos roles explicativos puede

ser una razón para buscar una forma de identificarlos, pero no es una razón, de ninguna forma, para creer que son la misma entidad. No es condición suficiente, y quizá tampoco necesaria, para la identidad de dos entidades el que éstas tengan un rol explicativo similar o exactamente igual. Por ejemplo, postular que hay un ratón en algún lugar de mi cocina puede explicar por qué desapareció un queso dentro de ella; del mismo modo, se puede explicar lo mismo postulando la existencia de una rata en la cocina. Sin embargo, pese a compartir un rol explicativo, una rata y un ratón obviamente no son lo mismo.

¿Qué hay de las razones de Earman y Norton a favor de considerar a la métrica como la representante única del espaciotiempo? Recordemos que, como señalé un poco más arriba, Earman y Norton creían que no podía incluirse a la métrica como parte del espaciotiempo pues ellos creían que era claramente un campo físico debido a que contiene al campo gravitatorio. Hofer piensa que el campo gravitatorio, contenido en el campo métrico, no contiene realmente energía y momento, debido a que es representado por un pseudo-tensor. En segundo lugar, Hofer señala que si la métrica es clasificada como un campo físico en el espaciotiempo, entonces surge la siguiente situación:

Moreover, if the metric is classified as a physical field in space-time, rather than as representing part of space-time itself, the following odd situation emerges. Space-time itself is not appealed to in explaining the motions of material things; they are explained by relations to a different kind of physical field. Even distances and other geometric relations have nothing to do with space-time, but instead with the relations between two kinds of physical fields in

space-time. When substantivalism starts to sound like relationism, something is wrong! [Hofer, 1996, 13]

En efecto, si la métrica es clasificada como un campo físico, entonces el movimiento de las cosas materiales es explicado por las relaciones entre diferentes tipos de campos físicos, algo muy favorable para el relacionista. Creo que este señalamiento debería motivar a los sustancialistas a evitar interpretaciones de la variedad como representante del espaciotiempo en TRG. Sin embargo, el argumento sólo es un argumento a favor de la interpretación del espaciotiempo como variedad más campo métrico sólo si aceptamos de antemano que el sustancialismo es el caso, cosa que no deberíamos dar por sentado. Ahondemos en esto: la cuestión es si el espaciotiempo es representado por la variedad o por ésta más el campo métrico. El argumento de Hofer sostiene que si la variedad representa al espaciotiempo, entonces las relaciones espaciotemporales son explicadas como relaciones entre campos físicos (en otras palabras, entonces parece que el relacionismo es el caso). Como somos sustancialistas, el argumento prosigue, entonces debemos negar que el espaciotiempo es representado sólo por la variedad. No obstante, como no damos por sentado que el sustancialismo es el caso, entonces el argumento falla como argumento a favor de considerar al campo métrico como parte del espaciotiempo.

La cuestión de si el campo gravitatorio contiene energía o no es una cuestión difícil de tratar y por esta razón ha habido dificultades en torno al estatus del campo métrico. ¿Qué hay sobre la naturaleza pseudo tensorial del campo gravitatorio señalada por Hofer? Que la energía del campo gravitatorio sea representada por un pseudo tensor quizá puede indicar que no contiene energía sustancial (en el sentido

de que no hay un pseudo tensor con estatus privilegiado). Sin embargo, la cuestión no es si contiene energía sustancial, sino si contiene energía. Así, no veo cómo señalar la naturaleza pseudo tensorial del campo gravitatorio es un argumento convincente en contra de adscribir energía al campo gravitatorio y, por lo tanto, al campo métrico. Lo que Hofer debería ofrecer aquí es un argumento en contra de que el campo gravitatorio contenga energía. En su lugar, nos presenta una razón en contra de que dicho campo contenga energía sustancial.

### **Conservación de la energía en TRG**

Hofer [2000] ha presentado de forma más detallada su postura sobre por qué el campo gravitatorio, y por lo tanto el campo métrico, no contienen energía. Su argumento parte de que no hay un principio general de conservación de la energía en la TRG, y afirma que esta ausencia debería dejar claro que el campo métrico no contiene energía. La razón para creer que debe haber esa energía es la intuición de que algún principio de conservación debe mantenerse en la TRG. Sin embargo, si la energía no es conservada de forma general, ‘there is no need to make up a story about where it has gone when a system loses it.’ [Hofer, 2000, 196]

En su artículo, Hofer trata con casos que muestran, supuestamente, que hay pérdida o ganancia de energía de forma gravitatoria. Sistemas materiales aislados, como un sistemas de estrellas binarias, pierden energía; ésta, uno naturalmente supone, se va de forma gravitatoria. Sin embargo, si no hay un principio general de conservación de la energía, entonces no hay lugar para especular sobre dónde se ha ido. De igual forma, los casos de efectos de ondas gravitatorias, como los observados cuando un objeto es atraído a la Tierra, pueden ser considerados como genuinas

ganancias de energía, sin tener que decir que la energía existió antes en algún lugar. El punto, Hofer señala, es que no podemos decir de dónde surgió esa energía, en el caso del detector, ni a dónde se fue, en el caso de los sistemas de estrellas binarias, si nos tomamos en serio la falta de un principio de conservación de la energía [Hofer, 2000, 196].

Hofer extrañamente apunta a que las consideraciones hechas arriba derriban un argumento sustancialista según el cual el espaciotiempo es una sustancia, en el mismo sentido que la materia, pues contiene energía.<sup>5</sup> Digo ‘extrañamente’ pues si el campo métrico contiene energía parece que debería ser interpretado más como algo físico y no como parte del espaciotiempo, lo cual parece ir en en contra de la postura de Hofer de considerar a la variedad más el campo métrico como parte del espaciotiempo.

Creo que el argumento de Hofer es, a lo mucho, una objeción a algunas razones que pueden aducirse a favor de considerar que el campo gravitatorio contiene energía. Sin embargo, su argumento no consigue justificar la postura según la cual el campo gravitatorio no contiene energía.

Veamos esto de forma más precisa. La cuestión es si el campo métrico contiene energía o no la contiene. Ahora bien, se suele argumentar que tiene energía apelando a ciertos casos, como el de las ganancias de energía de objetos por un campo gravitatorio, o el de la pérdida de energía que presentan estrellas binarias, casos en que estas ganancias y pérdidas se relacionan con formas claras de materia. Sin embargo, como Hofer señala, si no hay un principio general de conservación de la

---

<sup>5</sup>En el siguiente capítulo consideraremos este argumento.

energía, entonces no deberíamos tomarnos muy en serio este tipo de casos, pues no hay lugar para especulaciones sobre de dónde vino o a dónde fue esa energía. Si esto es así, entonces debemos negar que los casos intuitivos apoyan la tesis de la métrica material. No obstante, negar esto nos lleva a la disyunción inicial: el campo métrico contiene energía o no la contiene. Lo más que hace Hofer, repito, es negar el tipo de evidencia que se suele presentar a favor de sostener que el campo métrico contiene energía.

### 2.2.2. Métrica indeterminada

¿El sustancialismo de campo métrico está obligado a ver al campo métrico como algo no material? Creo que la respuesta es no. Además, creo que el sustancialista está obligado a mantenerse agnóstico sobre esta cuestión debido a las dificultades que acabamos de señalar en las secciones anteriores. Si el sustancialismo de campo métrico ha de ser una postura viable, entonces los sustancialistas deben desistir, mientras no haya más argumentos al respecto, de su postura de que el campo métrico es parte del espaciotiempo.

Recordemos que la característica principal del sustancialismo de campo métrico es su negación del *haecceitism*. Suponer que el campo gravitatorio, y por lo tanto el campo métrico, son campos físicos, no es inconsistente con esta forma de *anti-haecceitism*. Supongamos que  $x$  es un punto en  $M$  con las propiedades  $\Phi$ . Si queremos ser anti-haecceitistas sobre  $x$  basta con decir que no podemos hablar de  $x$  sin hacer alusión a las propiedades  $\Phi$ , independientemente del tipo de propiedades que señale  $\Phi$ .

Debido a las dificultades que tiene identificar al campo métrico como parte del espaciotiempo, la única alternativa para el sustancialista de campo métrico es sostener que, hasta ahora, la métrica tiene una naturaleza indeterminada. Esto es, no hay evidencia suficiente para decir que dicho campo contiene o no energía. Sin embargo, aunque la naturaleza del campo gravitatorio, y por lo tanto del métrico, esté indeterminada, esto no elimina la posibilidad de su uso para el sustancialismo. Puede hacerse uso de las propiedades que otorga el campo métrico a los puntos espaciotemporales sin decir que dicho campo es parte del espaciotiempo. El sustancialismo de campo métrico así expuesto sostiene que el campo métrico determina las propiedades de los puntos espaciotemporales de la variedad, aunque no es parte del espaciotiempo.

¿Por qué sustancialistas como Hofer insisten tanto en considerar al campo métrico como parte del espaciotiempo? Consideraremos esta pregunta y otras más en el siguiente capítulo, en el que nos centraremos en las razones a favor y en contra del sustancialismo de campo métrico.





## Capítulo 3

# Los argumentos sobre el sustancialismo

En este capítulo trataremos con los argumentos a favor y en contra del sustancialismo de campo métrico. Primero describiré a los argumentos a favor y sostendré que, excepto el primero de ellos, todos son problemáticos. Después presentaré tres argumentos en contra del sustancialismo de campo métrico.

Como comenté en la introducción, mi postura no es relacionista, sino que más bien es cercana a aquellas que consideran que el debate sobre el estatus del espacio-tiempo en el contexto actual está mal definido y que en realidad no hay un debate genuino. Lo que me propongo a hacer aquí consiste en mostrar que una de las teorías más populares en el debate es falsa.

Antes de empezar, será útil recordar que el sustancialismo de campo métrico, tal como lo hemos venido describiendo, es una postura sustancialista sobre el espacio-tiempo que se caracteriza por sostener que éste existe de forma independiente

a cualquier otra entidad y, además, por sostener una forma de *antihaeccetism* de los puntos espaciotemporales, de forma que éstos no poseen identidad primitiva. Durante todo el capítulo me estaré refiriendo a la postura relacionista sobre el espaciotiempo, entendiéndola como la teoría que considera que hablar de puntos espaciotemporales en física es sólo una forma útil de hablar sobre el mundo que no nos compromete con la existencia de una entidad como el espaciotiempo.

Comencemos pues con los argumentos que se han hecho a favor del sustancialismo de campo métrico.

### 3.1. Argumentos a favor del sustancialismo de campo métrico

#### 3.1.1. Brighouse y el *antihaeccetism*

Vimos en el capítulo anterior que la principal característica del sustancialismo de campo métrico está en su aceptación del *antihaeccetism*. ¿Qué razones hay para aceptar esta postura metafísica sobre la naturaleza de los puntos espaciotemporales? Brighouse [1994] ofrece un argumento a favor de esta postura a partir de una reducción al absurdo. Su argumento nos dice que, si el *antihaeccetism* no es el caso, entonces debemos negar la existencia de entidades que claramente existen.

El argumento apunta a que el sustancialista no está comprometido con la idea de que los puntos espaciotemporales tienen identidad primitiva. Brighouse comienza señalando que se ha asumido en el debate que los puntos espaciotemporales tienen identidad primitiva; además, Brighouse se inclina por la idea de que esto tiene

una razón de ser histórica que tiene su origen en el debate entre Leibniz y Clarke. En efecto, en el debate clásico se hablaba de puntos espaciales sin considerar las propiedades que estos tuvieran.

Si el *antihaeccitism* fuera una postura no viable para un realista de los puntos espaciotemporales, el argumento nos dice, entonces podrían usarse argumentos similares a los que se utilizan en contra de la existencia de puntos espaciotemporales para negar la existencia de cualquier tipo de entidades [Brighouse, 1994, 123]. Brighouse nos pone el ejemplo de dos electrones, A y B, en este mundo, donde A y B son cualitativamente distintos, por ejemplo A es parte de un átomo de helio y B es parte de un átomo de hidrógeno. Después, continúa Brighouse, imaginemos un mundo distinto, pero cualitativamente idéntico a este mundo, donde el electrón A y el electrón B han cambiado de lugar durante toda su existencia. Si se insiste en que estos mundos son el mismo mundo, en virtud de que los mundos tomados como un todo son cualitativamente idénticos, entonces debe verse esto como un argumento tan poderoso en contra de la existencia de los electrones como el argumento del agujero lo es contra los puntos espaciotemporales. Sin embargo:

Of course there is a Leibnizian response to this argument against electrons. We should consider the qualitative properties of the electrons in the two descriptions of the world. Electron A in the one shares all the properties, including relational properties to other qualitatively described objects, of electron B in the other. Applying the identity of indiscernibles to the worlds, assuming that there is no complete symmetry of the world with respect to qualitative properties that maps A onto B,

leads us to conclude that electron A according to the first description is just electron B according to the second description. They are just two different ways of talking about the same world [Brighouse, 1994, 122].

Brighouse sostiene que la misma salida debería ser tomada por el sustancialista de los puntos espaciotemporales para escapar del argumento del agujero. Así, un sustancialista puede sostener que dos modelos unidos por la equivalencia de Leibniz representan al mismo modelo.

La analogía del argumento de Brighouse va en el sentido de señalar que no aceptar al *haecceitism* para el caso de los puntos espaciotemporales implica indeterminismo en la TRG, mientras que hacerlo para los electrones implica indeterminismo en la teoría de los electrones. En esencia, la idea de Brighouse expone que adscribir identidad primitiva tanto a puntos espaciotemporales como a electrones nos compromete con modelos del mundo que son cualitativamente idénticos pero, no obstante, distintos. La autora parece pensar que es razonable creer que puntos espaciotemporales existentes tienen diferentes formas de ser expresados a través de diversos modelos de la TRG.

Sin embargo, aceptar el antihaecceitism no es suficiente para sostener la tesis de que el espaciotiempo es una sustancia.

Para justificar al sustancialismo de campo métrico es necesario ofrecer más razones. En lo que sigue consideraremos algunos argumentos que pretenden ser suficientes para su justificación.

### 3.1.2. Argumento de la energía del espaciotiempo

Hacia el final del segundo capítulo mencioné a un argumento que Hofer [2000] discute y que apoya a la tesis sustancialista. Según este argumento, el espaciotiempo es una sustancia en el mismo sentido que la materia pues contiene energía que está presente en el campo gravitatorio y, por lo tanto, en el campo métrico. La idea básica del argumento reside en la suposición de que si algo tiene energía, entonces existe de forma independiente. Llamemos a este argumento el *argumento de la energía del espaciotiempo*.

Como ya vimos, Hofer rechaza este argumento al sostener que el campo gravitatorio no contiene en realidad energía. El argumento más fuerte que ofrece para sostener esto consiste en decir que, como no hay un principio de conservación de la energía general en la TRG, entonces no hay lugar para pensar que el campo gravitatorio contiene energía. Sin embargo, argumenté que, en el mejor de los casos, lo que Hofer hace es rechazar la supuesta evidencia que hay para considerar al campo gravitatorio como conteniendo energía, pero que no consigue justificar su postura según la cual éste no la tiene. Si hay un debate sobre si A es B o no B, decir que la razón C no funciona para sostener que A es B no nos compromete a sostener que A es no B.

Si los argumentos de Hofer no son suficientes para negar que el campo gravitatorio, contenido en la métrica, no contiene energía, entonces parece que debemos considerar al argumento sustancialista sugerido por Hofer según el cual el espaciotiempo es sustancial debido a que contiene energía.

El primer problema con este argumento está en que supone que el campo gravi-

tatorio contiene energía, cosa que, como vimos, no es clara. Mientras no se aclare la cuestión sobre si éste la contiene o no cualquier argumento que parta de una de las dos opciones será un argumento débil.

No obstante, el argumento aquí presentado puede hacerse mucho más fuerte si consideramos lo siguiente.

#### **Argumento reforzado**

Parece claro que el espaciotiempo contiene o no contiene energía. Partiendo de esta disyunción podemos reformular al argumento de la energía del espaciotiempo para hacerlo más fuerte. En su nueva versión, el argumento nos indica que cualquier opción que tomemos de la disyunción apoya a una interpretación sustancialista del espaciotiempo en la TRG. Veamos las dos partes de la disyunción.

Si es el caso que el espaciotiempo no contiene energía, entonces pueden formularse razones muy fuertes en contra de una interpretación relacionista de la TRG. Por ejemplo, si asumimos que el espaciotiempo está compuesto de la variedad más el campo métrico (movimiento válido si aceptamos que la métrica no contiene energía), entonces el relacionista se encuentra ante el reto de explicar cómo es que la TRG permite modelos ‘vacíos’.<sup>1</sup> Más todavía, el relacionista debe dar cuenta de modelos de la TRG ‘vacíos’ que son distintos, como los que corresponden a soluciones con agujeros negros y a los de la TRE.

Las dificultades del relacionista para dar cuenta de estos modelos de la TRG no son imposibles de superar. Teller [2010] ofrece una interpretación relacionista

---

<sup>1</sup>Es decir, donde no hay materia (donde el campo material es cero para cualquier punto) pero hay una variedad y un campo métrico.

de estos modelos ‘vacíos’ donde el autor concede que el espaciotiempo no contiene energía. La base de su postura está en sostener que cada punto del espaciotiempo puede ser interpretado como un cuerpo posible. Hablar de cuerpos posibles no es algo ajeno a la física, lo cual no significa que los físicos sean conscientes de ello. Al hacer cálculos sobre cómo se comportaría una partícula en tales o cuales condiciones, uno supone a un cuerpo posible.

No entraremos a detalle en la propuesta de Teller. Lo único que quiero señalar es que las interpretaciones relacionistas de espaciotiempos vacíos son posibles, lo cual significa que la primera parte de la disyunción no nos obliga a aceptar al sustancialismo de campo métrico.

La otra parte de la disyunción, *i.e.*, el espaciotiempo contiene energía, da una imagen de la TRG que me parece más fácilmente explicable de forma relacionista. Una explicación de este tipo no tendría que lidiar con espaciotiempos vacíos pero distintos. Pero, el sustancialista podría replicar, si los puntos de una variedad tienen la propiedad de poseer energía, ¿cómo es posible que no existan de forma sustancial? ¿No es acaso suficiente que contengan una propiedad para que asegure su existencia?

La cuestión yace en cómo debemos interpretar a los puntos de la variedad y al campo métrico. ¿El campo define propiedades sobre puntos, o en realidad sólo existe un campo sin puntos (que al contener energía se interpreta como un campo físico más)? Como ambas posibilidades son viables, decir que el campo métrico contiene energía no nos compromete con sostener una postura sustancialista.



### **3.1.3. Argumento del compromiso ontológico de los puntos espaciotemporales**

Otro argumento que puede ser presentado a favor del sustancialismo toma su fuerza del compromiso ontológico de Quine. De acuerdo con este, debemos comprometernos con la existencia de entidades postuladas por teorías que consideramos verdaderas, entidades que podemos encontrar al identificar qué variables de nuestra teoría están ligadas a cuantificadores de primer orden.

Discutimos hace poco si debíamos tomar a los puntos como poseedores de las propiedades que les asigna el campo métrico, o si debíamos considerar al campo métrico como una entidad independiente al espaciotiempo; el argumento que apela al compromiso ontológico de Quine nos dice que debemos comprometernos con la existencia de puntos espaciotemporales solamente en virtud de que, al cuantificar sobre la TRG, los puntos resultan ser variables ligadas a cuantificadores de primer orden.

El compromiso ontológico de Quine no nos dice con qué tipo de entidades uno está comprometido al aceptar una teoría científica. Más bien, señala un conjunto de roles que son cumplidos por algo dentro de una teoría e impone que ese algo debe existir. Como la TRG puede ser formulada sin hacer alusión a puntos espaciotemporales, los roles que éstos pudieran tener son cumplidos por otras entidades. De este modo, el compromiso ontológico parece ser neutro sobre la cuestión de si debemos interpretar a los puntos espaciotemporales como existentes o no.

### 3.1.4. Argumento de la indispensabilidad del espaciotiempo

En lo que sigue vamos a considerar al argumento clásico más importante y, quizá, más fuerte que hay a favor de muchas formas de sustancialismo. Se trata de un argumento que tiene sus raíces en el argumento de la cubeta de Newton y que apela a la necesidad de postular la existencia del espacio (espaciotiempo) para poder explicar los efectos inerciales.

Cuando una persona está en el asiento de un vehículo mientras éste acelera sentirá que su cuerpo es atraído al asiento. De igual forma, una persona sentirá una fuerza similar al estar en un juego mecánico que gire (cualquier forma de movimiento circular cuenta como movimiento acelerado). A estos fenómenos se les conoce como efectos inerciales.

Hay objetos acelerados que, no obstante, no experimentan efectos inerciales. Dos vehículos, uno en reposo relativo a una carretera, el otro acelerando con respecto a ella, se encuentran, ambos, acelerados con respecto al otro. Sin embargo, sólo uno experimenta efectos inerciales. Esto implica una distinción entre dos tipos de aceleraciones, una absoluta o real (la que produce los efectos inerciales) y otra sólo relativa. De forma clásica se ha pensado que los relacionistas sólo pueden reconocer las aceleraciones relativas.

Los sustancialistas han sostenido, desde Newton, que asumir la existencia del espacio (espaciotiempo) da cuenta de la distinción entre la aceleración absoluta y la aceleración relativa. Las aceleraciones absolutas, sostienen, son aceleraciones con respecto al espacio absoluto.

Ahora bien, ¿en qué sentido es que los relacionistas no pueden dar cuenta de

los dos tipos de aceleración? Obviamente no es en un sentido descriptivo, *i.e.*, un relacionista no tiene problemas al describir que en ciertos tipos de aceleración hay efectos inerciales. La cuestión yace en que los relacionistas no parecen poder decir por qué en un caso hay efectos inerciales y por qué no en otros.

Sobre este problema, Sklar [1974] ha sugerido que el relacionista puede dar cuenta de los dos tipos de aceleración al sostener que la aceleración absoluta puede ser entendida como una propiedad básica del cuerpo que acelera. Tradicionalmente, tanto sustancialistas como relacionistas han pensado en la aceleración (absoluta o relativa) como aceleración con respecto a algo. Para el relacionista, la aceleración de cualquier entidad es aceleración con respecto a otro objeto; para el sustancialista, la aceleración absoluta es aceleración con respecto al espacio (espaciotiempo) mientras que la aceleración relativa lo es con respecto a otros objetos. La propuesta de Sklar consiste en sostener que hay ciertos tipos de aceleración que tienen las características de la aceleración absoluta y que esto se debe a una propiedad del objeto que acelera.

¿Es la propuesta de Sklar apropiada? No realmente si queremos una explicación que no sea *ad hoc*. Lo que el sustancialista reclama del relacionista, y que cree poseer, es una explicación independiente de por qué hay dos tipos de aceleración. Aquí el sustancialista no sostiene que apelar a propiedades básicas sea una equivocación. Más bien, a lo que apunta es a que el sustancialista puede dar cuenta de forma más satisfactoria de la diferencia entre aceleraciones.

Mi postura sobre este asunto es que hay ciertos tipos de sustancialismo en determinadas teorías físicas que permiten una diferenciación entre aceleración absoluta y aceleración relativa. Sin embargo, creo que esto no es el caso para el sustancialismo

de campo métrico en el contexto de la TRG. Al menos, no conozco a nadie que haya explicado la diferencia entre los dos tipos de aceleración en este contexto.

En el caso de la física de Newton la distinción podía hacerse si se asumía un espacio newtoneano y al sustancialismo. En dicho espacio, los puntos que lo conforman se mantienen sin cambio y persisten en el tiempo. Se puede identificar al movimiento relativo como el movimiento que tienen los cuerpos que mantienen su posición con respecto al mismo punto espacial o cambian de posición siguiendo una trayectoria recta y con un mismo intervalo para el cambio de un punto a otro. Cualquier otro tipo de movimiento es absoluto.

En el caso de la TRG, el espaciotiempo no permite este tipo de explicaciones de la diferencia entre tipos de movimientos. Al menos, no sé de alguien que se haya dado a la tarea de explicar cómo asumir una postura sustancialista del espaciotiempo puede dar cuenta de la diferencia entre movimientos. Si esto es así, entonces el sustancialista en el contexto de la TRG está en el mismo lugar que el relacionista en lo que respecta a la explicación que pudiera tener sobre la diferencia entre tipos de aceleración.

## 3.2. Argumentos en contra del sustancialismo de campo métrico

### 3.2.1. Argumento de la falta de una base conceptual en el debate

El debate entre sustancialistas y relacionistas se suele rastrear hasta la discusión entre Leibniz y Clarke. Antes de ellos, sin embargo, los estatus del espacio y el tiempo ya habían sido discutidos por Aristóteles y Descartes, entre otros. Creo que la principal razón por la cual se considera al debate entre Leibniz y Clarke como el punto de partida en el problema sobre el espaciotiempo está en que ellos tenían un contexto apropiado para hacerlo: la física de Newton.

La física propuesta por Newton y, en particular, las definiciones que éste dio de términos como ‘espacio absoluto’ y ‘tiempo absoluto’ *permitieron que las partes del debate conocieran qué es lo que se estaba discutiendo*. Antes del corolario de los *Principia* ‘espacio’ y ‘tiempo’ eran conceptos oscuros que no permitían una discusión clara sobre su estatus. ¿Qué sentido podría tener decir que el espacio existe si sólo hay una intuición mínima sobre lo que éste es? Se elige a la discusión entre Leibniz y Clarke como el inicio del debate entre sustancialistas y relacionistas porque por primera vez en la historia había una discusión, más o menos, clara.

Con la llegada de las teorías de la relatividad el contexto de la discusión cambió de terreno. El debate que en algún momento tuvo un terreno firme dejó de tenerlo. Podría pensarse que esto es exagerado pues con el cambio a la relatividad nuestro conocimiento sobre el comportamiento del espacio y el tiempo aumentó. Es verdad

que hubo un avance importante sobre nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Por ejemplo, dejamos a un lado la idea, planteada por Newton en los *Principia*, de que el tiempo no varía para diferentes observadores y también la creencia de que nuestro mundo es un mundo con geometría plana. Sin embargo, estos avances también estuvieron acompañados del derrumbe de la terminología que hacía posible el planteamiento de un debate claro entre sustancialistas y relacionistas.

Mi postura frente al debate sobre el estatus del espaciotiempo es escéptica en el sentido de que creo que hay fuertes razones para pensar que la discusión misma parece no tener sentido, al menos en los términos en que actualmente está planteada. Una primera razón para creer esto es que no tenemos una definición clara y aceptada de forma mayoritaria sobre lo que se discute, el espaciotiempo. Y, por supuesto, que el debate tenga problemas en su planteamiento significa que cualquier propuesta que intente resolverlo, como el sustancialismo de campo métrico, también está en dificultades.

Se me ocurren dos objeciones que podrían plantearse. La primera consiste en que decir que no están bien definidos los conceptos del debate actual entre sustancialistas y relacionistas no parece hacer justicia a los intentos, de ambos lados, de responder a qué es lo que representa al espaciotiempo en la TRG. En el debate este ha sido un tema tratado en múltiples ocasiones. Se ha sostenido que el espaciotiempo son los puntos espaciotemporales de una variedad [Butterfield, 1988] o que son estos más el campo métrico [Hofer, 2000] o los mismos con propiedades asignadas por los campos [Brighouse, 1994].

La variedad de presuntos representantes del espaciotiempo en la TRG muestra

la falta de consenso sobre el tema, de modo que mi señalamiento sobre la falta de una terminología definida sobre la cual afianzar el debate sigue siendo válido. Creo que será conveniente para la discusión general que se considere la cuestión de qué representa el espaciotiempo no como a una cuestión secundaria sobre el debate sino como el eje de la discusión, al menos mientras no se llegue a un consenso sobre el tema.

Otra objeción podría tomar el camino de criticar que se pueda pasar del hecho de que hay problemas conceptuales dentro del planteamiento de un problema a que el debate no tenga sentido y, por lo tanto, que el sustancialismo sofisticado sea falso. Esta objeción sostendría, en breve, que señalar problemas interpretativos no representa un problema insoluble para quien cree que el debate tiene sentido. Creo que esta objeción tiene fuerza. Decir que hay problemas al plantear un problema no significa que no haya problema o que las soluciones propuestas sean falsas. No obstante, creo que señalar los problemas conceptuales de la discusión tiene ventajas. Por ejemplo, como señalé antes, centra la atención del debate en la clarificación del mismo.

#### **3.2.2. Argumento de la falta de diferencia entre sustancialismo y relacionismo**

En esta sección defenderé el siguiente argumento y una versión modificada del mismo que surgirá más adelante.

1. Toda diferencia no trivial entre teorías es una diferencia en sus predicciones,

en su capacidad explicativa o en sus consecuencias valorativas. Ninguna otra diferencia es no trivial.

2. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en sus predicciones.
3. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en su capacidad explicativa.
4. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en sus consecuencias valorativas.<sup>2</sup>
5. Por lo tanto, no hay diferencia no trivial entre el sustancialismo de campo métrico y el relacionismo.

Antes de defender las premisas del argumento me gustaría aclarar qué es lo que éste busca y cómo esto es un problema para el sustancialista de campo métrico. Para esto vamos a considerar un caso ficticio.

Supongamos que dos detectives, por separado, se han dado a la tarea de investigar a un asesino y han dado con dos hipótesis independientes sobre el responsable.

---

<sup>2</sup>Esta premisa puede parecer extraña a muchas personas. Cuando hablo sobre ‘consecuencias valorativas’ me refiero al tipo de consecuencias que una teoría puede tener sobre nuestros juicios valorativos. Este tipo de diferencias son útiles para distinguir, por ejemplo, entre teorías éticas. El utilitarismo se distingue de las teorías kantianas, entre otras cosas, por señalar a un conjunto de actos, calificados como buenos, que es distinto de los señalados como tales por la ética kantiana. La TRG no genera consecuencias valorativas de ningún tipo, de modo que este tipo de diferencias no es aplicable al caso que estamos considerando. No obstante, coloqué la premisa pues creo que la diferencia en consecuencias valorativas es un criterio aceptable para distinguir entre teorías.



Ambas investigaciones son idénticas en todo excepto en el nombre con el que hacen referencia del presunto asesino. Uno de los detectives identifica a la persona como Juan y el otro como José (el acusado posee ambos nombres). Un día los dos detectives se encuentran y, al descubrir que utilizan nombres diferentes para referirse al presunto asesino, se enfrascan en una discusión sobre cuál es la teoría correcta. ¿Son las teorías de los detectives distintas o la misma? Bueno, en un sentido obvio son diferentes porque utilizan expresiones distintas para hacer referencia a una persona, pero esto parece ser insuficiente para decir que son teorías distintas porque implicaría que una teoría, como la evolución por selección natural, es distinta si es expresada en diferentes idiomas, lo cual resulta ridículo.

¿Qué podemos decir sobre las teorías de los detectives? Si en verdad no hay diferencia entre ellas entonces podemos concluir que es una cuestión de gusto llamar al presunto responsable Juan o José y que toda disputa acerca de cuál es la correcta no tiene sentido, puesto que son la misma teoría. De igual modo, decir que no hay diferencia no trivial entre el sustancialismo de campo métrico y el relacionismo significa que la elección entre uno u otro es una cuestión de gusto y que carece de contenido la disputa entre cual de las dos es correcta. Esto, por supuesto, es un problema para el sustancialismo de campo métrico, pues afirma ser distinto del relacionismo (por supuesto, esto también sería un problema para ciertos tipos de relacionismo).

La primera premisa del argumento sostiene que, para que dos teorías sean distintas, debe haber una diferencia en su capacidad explicativa, sus predicciones o sus consecuencias valorativas. Creo que podemos decir sin problema que la diferencia en

el poder explicativo de dos teorías, así como en sus predicciones, son suficientes para señalar a una como distinta de la otra. Sin embargo, no es claro que sea necesario que al menos una de las condiciones se cumpla para que dos teorías sean distintas. Mi argumento depende de que esto sea el caso. Creo que es intuitivo suponer que alguna de estas condiciones se debe cumplir para que dos teorías sean distintas pero no tengo argumentos extras para probarlo. El argumento parte de asumir esta premisa.

Podría pensarse que la premisa dos del argumento, no hay predicciones distintas entre sustancialismo y relacionismo, se sostiene dado que el sustancialismo de campo métrico es sólo una teoría interpretativa sobre la TRG. Es decir, dado que el sustancialismo de campo métrico es una teoría interpretativa, entonces no tiene injerencia en las predicciones de la TRG. Sin embargo, dependiendo de la forma de sustancialismo que se trate, puede haber, o no, predicciones diferentes. El argumento del agujero, el cual describimos al final del primer capítulo, sostiene que, si asumimos al sustancialismo, entonces para diferentes distribuciones de campos en modelos unidos por difeomorfismos hay diferentes predicciones. Como no hay forma de elegir entre los modelos, entonces, el argumento concluye, el sustancialismo hace a la TRG una teoría indeterminista. Como vimos en el segundo capítulo, una forma para escapar de este argumento consiste en sostener que diferentes distribuciones de campos en modelos unidos por un difeomorfismo representan a la misma situación. Esto debido a que los puntos espaciotemporales no tienen identidad primitiva (no se puede hablar de la individualidad de estos sin hacer referencia a las propiedades

que le asignan los campos). Este movimiento del sustancialismo de campo métrico hace que su propuesta sea estéril con respecto a predicciones extras a las de la TRG.

Sobre la tercera premisa. Un argumento clásico a favor del sustancialismo sostiene que asumir la existencia del espacio absoluto, o del espaciotiempo, explica a la distinción entre aceleración absoluta y relativa. No obstante, como vimos antes en este capítulo, pareciera que el sustancialista, en el contexto de la TRG, está en el mismo lugar que el relacionista en su dificultad para explicar a dicha distinción entre aceleraciones.

La conclusión del argumento es que no hay diferencia no trivial entre el sustancialismo de campo métrico y el relacionismo. Esta conclusión, por supuesto, no implica que el sustancialismo sofisticado sea falso. Lo que sí implica es que la cuestión sobre si uno quiere ser sustancialista o relacionista en este contexto es una cuestión de gusto. También implica que un sustancialista de campo métrico no puede justificar su afirmación de que su teoría es distinta del relacionismo.

Una objeción que muchos podrían tener, sobre todo las personas que encuentran en el realismo una postura atractiva en filosofía de la ciencia, está en que hay una diferencia obvia y no trivial entre el sustancialismo de campo métrico y cualquier forma de relacionismo: uno postula una entidad, el espaciotiempo, mientras que la otra no. La cuestión central aquí está en si la postulación de entidades distintas es una diferencia trivial o no entre teorías. Antes de dar respuesta a esta cuestión creo que es oportuno clarificar qué estoy entendiendo por diferencias no triviales entre teorías.

Al preguntarnos sobre qué tipo de elementos nos permiten diferenciar entre teorías parece claro que cierto tipo de diferencias no son suficientes para señalar una distinción entre las mismas. Por ejemplo, la teoría de la evolución por selección natural es la misma sea esta descrita en inglés o español. Una diferencia no trivial entre teorías, tal como estoy utilizando la expresión, no es más que una diferencia tal que resulta intuitivamente suficiente para diferenciar entre teorías.

Creo que es un punto de partida fuerte el de suponer que una diferencia entre capacidad explicativa, predicciones y consecuencias valorativas es suficiente para sostener que dos teorías no son la misma. La postulación de entidades distintas no me parece un criterio adecuado para diferenciar teorías pues visiones instrumentalistas de la ciencia no lo aceptarían como tal. Sin embargo, con miras a hacer lo más fuerte que pueda mi punto aquí, supongamos que la postulación de diferentes entidades sí es una diferencia no trivial. Si ese es el caso, entonces podemos modificar al argumento que presenté al inicio de esta sección:

1. Toda diferencia no trivial entre teorías es una diferencia en sus predicciones, su capacidad explicativa, sus consecuencias valorativas o en las entidades que postula. Ninguna otra diferencia es no trivial.
2. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en sus predicciones.
3. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en su capacidad explicativa.

4. El sustancialismo de campo métrico no es diferente del relacionismo en sus consecuencias valorativas.
5. El sustancialismo de campo métrico es diferente del relacionismo por las entidades que postula.
6. Por lo tanto, El sustancialismo de campo métrico es diferente de forma no trivial del relacionismo sólo por las entidades que postula.

Puestas así las cosas, podemos concluir esta sección diciendo que mi argumento concluye que o el sustancialismo de campo métrico no es diferente de forma no trivial del relacionismo o sólo lo es en virtud de las entidades que postula.

Como veremos en lo que sigue, si la única diferencia no trivial entre sustancialismo y relacionismo en este contexto son las entidades postuladas, entonces el sustancialismo se enfrenta a un problema importante.

#### **3.2.3. Argumento de la parsimonia**

¿Cómo decidir entre relacionismo y sustancialismo de campo métrico? Si se quiere insistir en que la postulación de diferentes entidades es suficiente para suponer una diferencia de teorías, entonces se puede apelar a la navaja de Ockham para elegir a una sobre la otra. Utilizando una expresión del principio que resulta útil para nuestro propósito, podemos decir que el principio sostiene lo siguiente:

*Principio de la navaja de Ockham:* En las mismas condiciones, si  $T_1$  es ontológicamente más parsimoniosa que  $T_2$  entonces es más racional preferir a  $T_1$  que a  $T_2$ .

Ambas teorías están en las mismas condiciones (no tienen diferentes predicciones ni diferente capacidad explicativa) una, el relacionismo, es ontológicamente más parsimoniosa que la otra, el sustancialismo de campo métrico, de modo que es más racional, por la navaja de Ockham, preferir al relacionismo sobre el sustancialismo.

Hay que notar que el relacionismo resulta más parsimonioso no sólo de forma cuantitativa sino también cualitativa. La falta de parsimonia en el sentido cualitativo es lo que inquieta a muchos filósofos de la física. Postular una entidad extra no es tan alarmante como postular un nuevo tipo de entidad, el espaciotiempo, único en su tipo.

Hay importantes cuestiones todavía debatidas sobre la navaja de Ockham (sobre todo acerca de la justificación que pueda haber del hecho de que sea más racional elegir a una teoría ontológicamente más simple). Sin embargo, la utilización de este principio es poco criticada de forma seria dentro de la filosofía y es un principio muy útil en diversos contextos donde debe elegirse entre dos o más teorías.

El argumento que acabo de plantear es simple y, debido a la gran literatura que hay sobre la navaja de Ockham no abundaré más en él. Para terminar quiero examinar una posible respuesta al argumento que apela a dicho principio.

Un sustancialista podría *morder la bala* con el argumento que acabo de señalar minimizando su impacto sobre el debate sobre la aceptación del sustancialismo de campo métrico. Esta persona podrá pensar que lo ideal al debatir sobre dos posibles teorías es ofrecer evidencia a favor de alguna y no razones basadas en principios.

Mi respuesta es que no puede haber evidencia disponible en la discusión sobre elegir sustancialismo de campo métrico o el relacionismo debido a que ambas predi-

### CAPÍTULO 3. LOS ARGUMENTOS SOBRE EL SUSTANCIALISMO

---

cen lo mismo al ser aplicadas en el contexto de la TRG. Además, la utilización del principio de la navaja de Ockham no es poca cosa si se tiene en mente que es nuestro único recurso contra la utilización de elementos mágicos o teológicos para explicar la realidad.

## Conclusiones

Una forma de argumentar en contra de quien no encuentra sentido en algún problema consiste en mostrarle respuestas a dicho problema. Éstas deben no sólo ser razonables, sino estar apoyadas por evidencia o argumentación. De forma contraria, quien no encuentra sentido en la discusión debe mostrar que las respuestas que se han dado son erradas.

En este pequeño texto me he dado a la labor, como escéptico que soy del debate entre sustancialistas y relacionistas, de tratar de mostrar que la teoría a la que hemos llamado sustancialismo de campo métrico es una teoría incorrecta. Mis argumentos se basaron en la falta de conceptos claros en el debate, la nula diferencia física entre el sustancialismo y el relacionismo y el hecho de que una visión relacionista del espaciotiempo resulta más parsimoniosa.

Suele haber cierto tipo de arrogancia en quienes defienden al sustancialismo de campo métrico pues consideran como un hecho dado los supuestos beneficios que ésta tiene sobre las visiones relacionistas del espaciotiempo. Además, no suelen considerar de forma seria a quienes han dudado de la viabilidad de la discusión. Espero por lo menos haber convencido al lector, y a mí mismo de forma honesta, de que dicha teoría está lejos de ser correcta y, mucho menos, obvia.





# Bibliografía

Isaac Newton. *The Mathematical principles of Natural Philosophy*. Daniel Adee, New York, 1846.

Hendrik Antoon Lorentz. *Attempt of a Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies*. Leiden: E.J. Brill, 1895.

Joseph Larmor. On a dynamical theory of the electric and luminiferous medium. *Philosophical transactions of the Royal society of London*, (190):105–300, 1897.

Joseph Larmor. *Aether and Matter*, chapter X-XI, page 174. Cambridge University Press, 1900.

Hendrik Antoon Lorentz. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 6:809–831, 1904.

Albert Einstein. Zur elektrodynamik bewegter körper, 'on the the electrostatics of moving bodies'. *Annalen der Physik*, 17:891–921, 1905. translation by George Barker Jeffery.

Herman Minkowski. Raum und zeit (espacio y tiempo). In *Jahresberichte der Deu-*

- tischen Mathematiker-Vereinigung (Congress of Natural Philosophers) at Cologne*, pages 1–14, 1909.
- A. Einstein. über das relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 2:411–462, 1907.
- A Einstein. Lichtgeschwindigkeit und statik des gravitationsfeldes. *Annalen der Physik*, 4:355–369, 1912a.
- A Einstein. Zur theorie des statischen gravitationsfeldes. *Annalen der Physik*, 4: 146–164, 1912b.
- Albert Einstein. The foundation of the general theory of relativity. In *The Principle of Relativity*, pages 111–164. Dover, 1916.
- John Stachel. Einstein's search for general covariance. In Don Howard and John Stachel, editors, *Einstein and the History of General Relativity*, pages 63–100. Birkhäuser, 1980.
- John Earman and John Norton. What price spacetime substantivalism the hole history. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 38(4):515–525, 1987.
- Tim Maudlin. The essence of space-time. *Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, pages 82–91, 1988.
- Carolyn Brighthouse. Spacetime and holes. In *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association Vol. 1994*, volume Contributed Papers, pages 117–125. The University of Chicago Press, 1994.

---

Jeremy Butterfield. Albert einstein meets david lewis. In *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association Vol. 1988*, volume Symposia and Invited Papers, pages 65–81. The University of Chicago Press, 1988.

John Norton. The hole argument. In *Psa: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association Vol. 1988*, volume Symposia and Invited Papers, pages 56–64. The University of Chicago Press, 1988.

Oliver Pooley. Substantivalist and relationalist approaches to spacetime, 2012. URL <http://philsci-archive.pitt.edu/9055/>. To appear in R. Batterman (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*.

Carl Hoefer. The metaphysics of space-time substantivalism. *The Journal of Philosophy*, 1996.

Favio Ernesto Cala. *De la Relatividad de la Inercia a la Geometrodinámica Intrínseca: Una Interpretación Relacional del Espacio-Tiempo*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Barcelona, 2006.

John D. Norton. The hole argument. In Edward N. Zalta, editor, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Fall 2011 edition, 2011.

Bradford Skow. Haecceitism, anti-haecceitism, and possible worlds. *The Philosophical Quarterly*, pages 98–107, 2008.

Carl Hoefer. Energy conservation in GTR. *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- and Philosophy of Modern Physics*, 31(2):187–199, 2000. URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1355219800000046>.
- Paul Teller. Substance, relations, and arguments about the nature of space-time. *Philosophical Review*, 2010.
- Immanuel Kant. *Crítica de la razón pura*. Losada, Buenos Aires, 2004.
- Ingemar Düring. *Aristóteles*. UNAM, 1990.
- Platón. *Diálogos; VI Filebo, Timeo, Critias*. Gredos, Madrid, 1992.
- G.W. Leibniz and Samuel Clarke. *The Leibniz-Clarke correspondence*. Hackett Publishing, Indianapolis, 2000.
- Ernst Mach. *The science of mechanics*. Open curt, Chicago, 1893.
- Lawrence Sklar. *Filosofía de la física*. Alianza, 1994.
- Lawrence Sklar. *Space, time, and spacetime*. University of California, Berkeley, 1977.
- John Earman. *World enough and space-time; Absolute versus relational theories of space and time*. 1989.
- Michael Friedman. *Foundations of space-time theories*. Princeton University, Princeton, 1983.
- Hendrik Antoon Lorentz. Simplified theory of electrical and optical phenomena in moving systems. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 1:427–442, 1899.

Morley Albert Abraham and Edward Williams. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 34:333–345, 1887.

A Einstein. Prinzipielles zur allgemeinen relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 55, 7:241–244, 1918.

Jeremy Butterfield. The hole truth. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 40:1–28, 1989.

*Space, Time, and Spacetime*. Berkeley: University of California Press, 1974.