

Sobre la dinámica relacional del espaciotiempo y la conservación de la energía en la Teoría General de la Relatividad

(Relational spacetime dynamics and energy conservation in the General Theory of Relativity)

Favio Ernesto CALA VITERY

Recibido: 10.09.2007

Versión final: 24.04.2008

BIBLID [0495-4548 (2008) 23: 62; pp. 175-193]

RESUMEN: En este artículo pretendo dismantlar la opinión generalizada según la cual una interpretación relacional del espaciotiempo no es posible. Centro mi atención en el hecho de que las variables dinámicas usualmente están asociadas a objetos materiales en las teorías físicas. El tensor métrico de la Teoría General de la Relatividad (TGR) es un objeto dinámico así que —sostengo— este debe ser mejor entendido como un campo material en toda regla. Este argumento me lleva a vincular la naturaleza relacional del espaciotiempo a las dificultades para formular una genuina ley de conservación de energía-momento en la TGR.

Descriptores: relacionismo, conservación de la energía, espaciotiempo.

ABSTRACT: *I will try to dismantle the widespread impression that a relational account of spacetime is not possible. I concentrate on the fact that dynamical variables are usually linked to material objects in physical theories. The metric tensor field of GR is a dynamical object so, I claim, it should be viewed as a matter field. The argument links the relational ontological status of spacetime to the failure to provide a genuine law of energy-momentum conservation within General Relativity.*

Keywords: *relationalism, energy conservation, spacetime.*

1. Introducción

La ontología de la física es un territorio de delicada labranza. Leibniz y Newton sentaron la arena de discusión. Discutieron la filosofía del espacio y el tiempo. En el transcurso aprendimos que el debate que les enfrentó sigue teniendo vigencia oponiendo relacionistas —seguidores de Leibniz— a sustancialistas —seguidores de Newton— en este asunto. Einstein, por su parte, pretendió materializar el relacionismo inspirado en las ideas de Mach, al tiempo que buscaba una nueva teoría de gravitación. De paso trasladó la arena de discusión desde la sustancialidad del espacio y el tiempo hacia la sustancialidad del espaciotiempo.

Hoy no es tan claro que el espaciotiempo reivindique la tradición relacional. De hecho la interpretación más popular de su teoría general de la relatividad reclama una lectura sustancialista del espaciotiempo, aunque incorpora, insólitamente, uno de los principios relacionales más preciados de Leibniz; a saber, la Identidad de los Indiscernibles (PII). Yo creo que esta extraña forma de *sustancialismo relacional* es innecesaria y que la evidente tensión se resuelve en favor de una interpretación relacional limpia. Para puntualizar mi posición empezaré por ofrecer una breve presentación retrospectiva del debate Relacionismo-Sustancialismo (R-S), antes de perfilar mi punto de vista.



Einstein logró sobreponerse a la limitada covarianza de sus ecuaciones de campo preliminares (1913) superando las objeciones que él mismo había impuesto mediante las restricciones debidas a su argumento del agujero. Al rescatar la covarianza general en sus ecuaciones de campo definitivas Einstein había salido de su propio agujero argumentando que ‘todas nuestras verificaciones espaciotemporales invariablemente corresponden a la determinación de coincidencias espacio-temporales’ (1916).

La covarianza general es uno de los aspectos más distintivos de la teoría de Einstein y este tipo de aclaración vaga de su significado fue recogido con entusiasmo en tempranas interpretaciones de la teoría. En particular, quienes se agrupaban bajo el positivismo lógico vieron en ésta una confirmación de la filosofía positiva de Mach y, presuntamente, una reivindicación del relacionismo à la Leibniz-Mach. Al fin y al cabo, Einstein había superado las viejas nociones absolutas de espacio y tiempo newtoniano.

Este tipo de argumentación fue defendida, entre otros, por Hans Reichenbach. Su libro sobre filosofía del espacio y del tiempo (1928) enfatizaba el carácter empírico de la geometría física. En las notas introductorias a la edición inglesa, Rudolf Carnap, juzga al libro como la mejor contribución al tema hasta la fecha (1956). Y así fue ampliamente aceptado, hasta que el desmoronamiento del positivismo lógico, el renacimiento del interés general por la cosmología relativista y el surgimiento del realismo científico obligaron a replantearse las cosas hacia finales de los 60s.

En su lectura más inocente, el realismo científico interpreta las estructuras y objetos de nuestras mejores teorías literalmente. Los modelos de la TGR consisten en una variedad (*manifold*) y unos campos distribuidos sobre los puntos (eventos) de la variedad espaciotemporal. Desde esta perspectiva, parecía natural interpretar la variedad espaciotemporal como un espaciotiempo sustancialista que aloja campos físicos. Así que por entonces la variedad se interpretó como una entidad estructurada cuya existencia es independiente de la presencia de campos materiales. Ésta se había convertido en el sucedáneo del contenedor absoluto espacial de la física de Newton (Earman 1970, Stein 1970, Friedman 1983). La variedad es parte integral de nuestras mejores teorías y las ecuaciones de campo hacían ver a los campos como propiedades de los puntos —las partes— de la variedad espaciotemporal.

Pero esta certidumbre sobre la existencia independiente del espaciotiempo en la forma de la variedad fue fracturada a finales de los 80. La filosofía del espaciotiempo se encontró entonces redescubriendo el argumento del agujero de Einstein. En su momento Einstein pensaba que la covarianza general implicada en el argumento violaba la ley de la causalidad. Igualmente, en su versión moderna (Earman y Norton 1987), el argumento del agujero debería señalar una dificultad interpretativa, a saber: si se suscribe una interpretación sustancialista de la TGR, ésta teoría debe ser juzgada como una teoría indeterminista. Esta conclusión es, evidentemente, contraria a la concepción general de la teoría implicada en su práctica científica. Las reacciones no se hicieron esperar, bien fuera impugnando la forma de indeterminismo que involucra el argumento por ser físicamente irrelevante, bien fuera suscribiendo directamente el relacionismo o, alternativamente, modificando la forma de entender el sustancialismo en la TGR (Por su relevancia, más adelante explico el argumento del agujero).

Recuperados de las secuelas del agujero reabierto por Earman y Norton (1987) la mayoría de filósofos del espaciotiempo han encontrado un clima estable en la última alternativa. A esta se le conoce con el nombre de sustancialismo sofisticado (SS) (Mundy 1992, Brighouse 1994, Di Salle 1994, Hofer 1996, Pooley 2002). En éste se argumenta que la mejor forma de entender el espaciotiempo es suscribiendo una interpretación realista del mismo, pero que es erróneo juzgar a la variedad despojada de estructuras adicionales como si se tratase de un espaciotiempo en toda regla.

En todo caso, la tensión del debate R-S sigue latente a pesar de que alguna de las reacciones más escépticas considera que el debate en el contexto actual está gastado (Rynasiewicz 1996). Esto porque, presumiblemente, las categorías que le dieron vida en los tiempos de Newton y Leibniz se proyectan indistintamente en la física actual. Mi opinión es contraria. La cuestión sobre la mejor —la correcta— interpretación de la TGR es filosóficamente relevante, por una parte y, por otra, conduce a importantes consideraciones físicas (Belot 1996, Belot y Earman 2001, Butterfeld e Isham 1999).

En los tiempos de Newton, Leibniz, Huygens y Descartes se discutían los problemas fundacionales de la mecánica. Se estaba pintando la imagen unitaria del mundo mediante la estructuración de una posible teoría física. Cuando esta teoría se estableció en la forma de la dinámica de Newton, algunos de sus problemas interpretativos no desaparecieron, pero la confianza en su poder pudo disipar la discusión filosófica por parecer físicamente intrascendente. Hoy, tres siglos después, el regreso a la filosofía natural viene por cuenta de esa nueva búsqueda de la imagen unitaria del mundo, esto es, de la búsqueda de una teoría de unificación de todas las fuerzas (TU) o, alternativamente, de una teoría de gravitación cuántica (GQ). En este contexto muchos de los principales investigadores ven el debate como un instrumento importante para su trabajo (Smolin 1991, Rovelli 1996). Pensar que el debate ha caducado equivale a pensar que la TGR es una teoría definitiva sin problemas interpretativos y resulta también de ignorar algunos adelantos hacia una mejor comprensión de la física prerrelativista (e.g. Barbour y Bertotti 1982).

Se ha mencionado insistentemente el argumento del agujero y aunque este es bien conocido empezaré por ofrecer una sucinta reconstrucción del mismo. Para esto utilizaré el lenguaje más económico de la geometría diferencial, en detrimento de la enunciación original de Einstein (1913) en lenguaje de coordenadas. Esto me permitirá, seguidamente, entrar en consideraciones propias al respecto.

2. *Emergiendo del agujero*

Cualquier modelo de la TGR (i.e., una solución a las ecuaciones de campo), que representa un universo posible, es usualmente representado por la tripleta (M, g, T) . Donde M es una variedad de puntos diferenciable con una cierta estructura topológica, g es el tensor métrico que codifica gravedad, estructura inercial y geometría, y T es el tensor de energía-momento que representa la distribución de materia-energía del universo posible.

La covarianza general de la TGR —y de cualquier teoría similar— implica, por definición, que si cualquier tensor X de la variedad es una solución a las ecuaciones de campo, también lo es el tensor $\Phi * X$ que resulta de empujar X mediante la acción de

un difeomorfismo *activo*. En este caso X es cualquier tensor métrico o material que pueda definirse sobre la variedad. Un difeomorfismo activo es esencialmente una transformación de coordenadas que lleva tensores de sus puntos de origen a otros alterando de paso la forma del tensor. Es importante distinguirlos de los difeomorfismos pasivos que actúan localmente como transformaciones de coordenadas que simplemente rebautizan los puntos de la variedad sin generar *movimientos* ni *deformaciones*. Este tipo de transformaciones pasivas resulta trivial para nuestra discusión ya que cualquier teoría puede hacerse covariante general pasiva simplemente requiriendo que sus ecuaciones de campo sean escritas en forma tensorial (Kretschman 1917, Friedman 1983). A cambio, un difeomorfismo activo $\Phi: M \rightarrow M$ lleva un punto p de M a otro punto $q := \Phi(p)$ en M , moviendo o deformando los ‘contenidos’ de la variedad.

El argumento del agujero es posible debido a la libertad para generar modelos de la TGR mediante la acción de este tipo de difeomorfismos activos. El conjunto de estos difeomorfismos forma un grupo denotado habitualmente como $\text{Diff}(M)$. Con esto en mente enuncio el argumento del agujero de Earman y Norton en forma compacta. Veamos:

Sea $U = (M, g, T)$ un modelo de la TGR. Por definición, es posible escoger cualquier difeomorfismo Φ de $\text{Diff}(M)$ para generar un nuevo modelo $U^* = (M, \Phi^* g, \Phi^* T)$ de la TGR. Se escoge $\Phi^* = id$ (transformación identidad) en toda la variedad M , exceptuando una región H de M dentro de la cual Φ difiere suavemente de la identidad. Esta región H es el *agujero* de Einstein. Dentro de éste $\Phi^* \neq id$. Por conveniencia suponemos que el espaciotiempo M admite una foliación (3+1) mediante rebanadas (hipersuperficies) globales tipo-espacio (spacelike). Es decir, suponemos que podemos partir el espaciotiempo en tajadas espaciales tabuladas por un parámetro temporal t que aumenta en la dirección futura a medida que nos desplazamos a lo largo de una curva tipo-tiempo (*timelike*). Ahora escogemos $H \subset M$ para $t > 0$, esto es, ponemos el agujero en el futuro.

El resultado de todo esto es que, como $\Phi^* = id$ para $t \leq 0$, pero difiere suavemente para $t > 0$ (i.e. dentro de $H \subset M$), tenemos dos modelos de la teoría que difieren a partir de $t = 0$. Esto es, $U = (M, g, T)$ y $U^* = (M, \Phi^* g, \Phi^* T)$ son idénticos hasta $t = 0$ pero difieren a partir de entonces¹. Y esto debería entenderse como una violación del determinismo en la TGR ya que la especificación completa del espaciotiempo y sus contenidos materiales (g, T) fuera del agujero no determina unívocamente la forma en que éstos se distribuyen dentro de los puntos del agujero. En nuestro caso, con un agujero puesto en el futuro, según la teoría, el futuro no vendría determinado unívocamente por esta especificación completa del pasado. Falla el determinismo.

Pero aquí es importante advertir la forma en que falla el determinismo. Por ejemplo, si el centro de una asteroide χ se encuentra ubicado hoy en el punto p , las ecua-

¹ En la versión original de Einstein, H no estaba, necesariamente, en el futuro. Pero fuera de H se suponía que el universo estaba lleno de materia ($T \neq 0$), mientras que en su interior no había materia ($T = 0$). Por esto recibió la denominación original de ‘agujero’. El difeomorfismo activo generado por Einstein parecía violar ‘la ley de la causalidad’ ya que la materia fuera del hueco no determinaba unívocamente la estructura inercial dentro de éste. Esto, de paso, parecía una violación flagrante del principio Mach o de la *condicionalidad material del espacio*, como Einstein le llamaba por entonces.

ciones de campo más el pasado no podrían determinar si mañana éste pasa por el punto q de M o por el punto r de M . Lo chocante del argumento no es que el determinismo falle, al fin y al cabo, el determinismo no tiene, necesariamente, que ser una camisa de fuerza de nuestras teorías. Ya tenemos a la mecánica cuántica en su interpretación estándar. Lo chocante proviene de la manera en que falla. El indeterminismo del agujero proviene de la imposibilidad para saber qué punto específico de la variedad subyace a qué proceso material concreto.

Las ecuaciones de campo no pueden escoger entre diferentes evoluciones de los campos dentro del agujero. En otras palabras, no pueden seleccionar a $U = (M, g, T)$ sobre $U^* = (M, \Phi^* g, \Phi^* T)$ para determinar si, por ejemplo, el asteroide χ pasará por q de M o por r de M . Pero, el asunto importante es que los modelos U y U^* de la TGR son empíricamente indistinguibles. Comparten la misma variedad espaciotemporal de puntos subyacentes pero discrepan, dentro del hueco, sobre la forma en que los campos y la materia son distribuidos sin que esto suponga ningún tipo de diferencia observacional.

Todos los invariantes de la teoría son preservados ante el tipo de transformaciones que generan el indeterminismo en el agujero. Y en estas circunstancias, un sustancialismo directo que hace una lectura literal de la variedad como una entidad física real cuyos puntos existen objetivamente y forman el tejido sustancial del espaciotiempo, enfrenta la siguiente traba interpretativa: Si la variedad M es considerada como un espacio físico real en toda regla, esto es, como una entidad capaz de existencia concreta con independencia de la ocurrencia de procesos materiales, entonces el sustancialista directo debe considerar a U y U^* como modelos físicamente, ontológicamente, distintos aunque estos sean empíricamente equivalentes. Esto claramente recuerda el argumento de los mundos desplazados de Leibniz, donde un universo probable U_i resultaba empíricamente indistinguible de un universo probable U_j , al conservar el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes, pero difería de éste por su ubicación en el espacio absoluto. El Newtoniano estaba obligado a conceder, dada la identidad presupuesta para los puntos del espacio, que los dos casos correspondían a situaciones ontológicamente diferentes. En su lugar Leibniz apelaba a la identidad de los indiscernibles (PII) para concluir que se trataba de dos representaciones de un mismo universo. En la terminología y contexto actuales la identidad de los indiscernibles recibe el nombre de *Equivalencia de Leibniz*. Este es un principio de inspiración relacional y puede enunciarse así:

Equivalencia de Leibniz (LE): Dos distribuciones de campos relacionadas por un difeomorfismo activo representan la misma situación física, esto es, $U = (M, g, T)$ y $U^* = (M, \Phi^* g, \Phi^* T)$ son equivalentes para cualquier Φ de $\text{Diff}(M)$.

En resumen, según Earman y Norton, el sustancialista debe rechazar LE y concluir extrañamente que la TGR es una teoría indeterminista. Por supuesto que las leyes de la física pueden admitir el indeterminismo, bien sea porque la teoría sea intrínsecamente probabilista, bien sea por la presencia de singularidades, o por la incursión de invasores espaciales (Earman, 1986. Cap. 3). Pero todas estas parecen aceptables, o buenas, razones físicas. La cuestión es que el determinismo debería fallar por buenas razones

de la física y no por compromisos con alguna doctrina ontológica que de entrada lo proscriba. En palabras de Earman, “al determinismo debería dársele una oportunidad” (Earman 1989, p. 180).

Los filósofos han visto diversas reacciones al argumento del agujero, pero la mayoría concuerdan con Earman y Norton en que el determinismo merece una oportunidad en la interpretación de la TGR, al fin y al cabo, esta es la forma habitual de concebir la teoría en la práctica científica. Es un indeterminismo que no afecta la determinación predictiva empírica de la teoría. Esto es raro. Por esto la mayoría suscribe LE y rechaza el sustancialismo directo que sostiene el argumento del agujero. La conclusión es la misma a la que Einstein llegó escapando del agujero, esto es, que los puntos de la variedad no tienen significado ontológico independiente, es decir, que presuponer la identidad primitiva de los puntos de la variedad lleva al tipo de indeterminación ingenua que le hizo caer en el agujero desde el principio.

Esta es ciertamente la posición ampliamente mayoritaria entre filósofos del espaciotiempo y cosmólogos activos. En su famoso tratado sobre la estructura del universo a gran escala, Hawking y Ellis (1973) simplemente se refieren a todos los modelos isomorfos de la TGR relacionados mediante $Diff(M)$ como una clase equivalente que representa la misma solución de las ecuaciones de campo (i.e. un único universo posible) sin ninguna mención al argumento del agujero. La presentación de Wald (1984) es similar.

La presunción tácita de LE, común a prácticamente todas las representaciones de la TGR, prohíbe la individuación apriorística de los puntos de la variedad. Pero aunque el rechazo generalizado a la identidad primitiva de los puntos del espaciotiempo —vía LE— pueda sonar muy relacional, la posición más consensuada se ha decantado por una interpretación sustancialista de la TGR en la forma, ya mencionada, del sustancialismo sofisticado.

La evidente tensión proviene, primero, de las diversas formas de definir el sustancialismo, y luego de los detalles interpretativos de estas definiciones.

Por ahora, del argumento del agujero retenemos el siguiente corolario:

En la TGR los puntos de la variedad no tienen identidad primitiva.

A continuación argumentaré que esto, en parte, conduce mejor a una interpretación relacional de la TGR.

3. Puntos sin identidad primitiva: ¿relacionismo o sustancialismo?

El argumento del agujero, hemos visto, está montado sobre la suposición de que el sustancialismo es una doctrina realista sobre los puntos del espaciotiempo y que estos constituyen el tejido del soporte universal de los procesos materiales. Por el contrario, el relacionismo debería refutar este estatus ontológico para el soporte universal de todos los fenómenos. Recientemente Belot y el propio Earman han insistido en esta forma de plantear el debate. Ellos escriben (Belot y Earman 2001, p 227):

Substantialists understand the existence of spacetime in terms of the existence of its point-like parts, and gloss spatiotemporal relations between material contents in terms of the spatiotemporal relations between points at which they occur. Relationists will deny that spacetime points

enjoy this robust sort of existence, and will accept spatiotemporal relations between events as primitive.

En discusiones recientes es bien cierto que por momentos una distinción clara entre los participantes de cada costado del debate R-S puede resultar cuando menos inquietante. La distinción que hacen Earman y Belot resulta interesante por cuanto parece estar atada estrechamente a las premisas del debate original, cuando Newton y Leibniz, presumiblemente, podían “darse el lujo de saber de que estaban hablando” (Earman 1989, p 18). Puntos o Materia. Contenedor o contenido. Esta forma de hablar hace parecer el debate una mera discusión sobre la aceptación de LE (relacionismo) o su rechazo (sustancialismo).

Mi impresión es que LE, o el rechazo a la identidad robusta o primitiva de los puntos del espaciotiempo, es una premisa necesaria aunque no suficiente para cualquier forma de relacionismo. Por su parte el sustancialismo es neutro en este asunto. Esto debe quedar claro del paso de la representación convencional newtoniana de la dinámica clásica a su representación en el espaciotiempo neo-newtoniano. En esta última los puntos son despojados de su identidad, al remover el espacio absoluto, y el énfasis del sustancialismo está puesto en la existencia robusta de las estructuras espaciotemporales. (El espacio absoluto es sustituido por la familia de sistemas inerciales equivalentes) Estas estructuras son independientes de la presencia de materia y hacen inteligible la idea de un cuerpo único moviéndose en el espacio sin relación a nada (material).

De todas formas Earman y Belot trazan su distinción argumentando que en el contexto de las probables teorías de Gravitación Cuántica (QG) o de campo unificado (TU) debe aparecer esta separación limpia en el debate. Ciertamente, la eclosión de una teoría en la que los puntos del espaciotiempo estuviesen cargados con el tipo de existencia robusta de la que hablan Earman y Belot, haría del sustancialismo una doctrina mucho más irrefutable, pero este no parece ser el caso, al menos hasta ahora. Sostengo que es más saludable considerar al sustancialismo como una doctrina realista sobre la existencia independiente de estructuras espaciotemporales. En esta línea, esta es la definición que hace Hoefer (1996, p. 5):

A modern-day substantialist thinks that spacetime is a kind of thing which can, in consistency with the laws of nature, exist independently of material things (ordinary matter, light, and so on) and which is properly described as having its own properties, over and above the properties of any material things that may occupy parts of it.

Estoy de acuerdo en la definición general. Pero discrepo en los detalles importantes. Especialmente en la clasificación de las ‘cosas materiales’. Hoefer hace su definición hablando como un sustancialista sofisticado.

El sustancialista sofisticado suscribe LE, es realista sobre la existencia independiente del espaciotiempo pero no asigna el estatus ontológico de espaciotiempo completo a la variedad desnuda. Una de las razones, aparte del argumento del agujero, es que la variedad funciona como una colección de puntos con estructura diferenciable y topológica pero carece prácticamente de todas las propiedades paradigmáticas que permiten referirse a ésta como si se tratara de un espaciotiempo en toda regla.

Por supuesto, para encontrar las propiedades paradigmáticas del espaciotiempo habría que mirar la dinámica de Newton. Y es que consideramos el espacio absoluto

newtoniano como una entidad real en toda regla porque éste tenía todas las estructuras que hacían teóricamente inteligible la idea de un cuerpo único en movimiento sin relación a nada (material). Y la variedad, por sí sola, no permite ni siquiera definir distancias espaciales ni temporales, no contiene la estructura inercial, tampoco permite distinguir pasado de futuro y por lo tanto dista mucho de cumplir el papel paradigmático que cumplía el espacio y el tiempo newtonianos o, en su defecto, el espaciotiempo neo-newtoniano.

Creo que esta razón es bastante sugestiva. La variedad es una entidad abstracta no exclusiva de la TGR y sin cargarla con estructuras adicionales está lejos de cumplir el rol explicativo que cumplía el espacio en la dinámica de Newton. Estas estructuras adicionales son básicamente estructuras métricas. La variedad carece de la estructura métrica necesaria para hablar, de alguna forma, de un espaciotiempo inteligible. Resulta algo paradójico considerarla como un espaciotiempo sin estructuras espaciotemporales. Por esto, en esencia, para el sustancialista sofisticado es más natural hablar de la dupla métrica + variedad (M, g) para referirse a un espaciotiempo físico real. En la TGR, el rol explicativo que cumplía el espacio newtoniano es facilitado por la métrica (g) .

SS hace bien al señalar las debilidades de la variedad para ser considerada como un espaciotiempo en toda regla. Sin embargo, resulta poco convincente al asignarle a la métrica el estatus de estructura sustancialista. Al hacerlo, el sustancialista sofisticado está tomando todas las propiedades de la métrica como propiedades intrínsecas de un espaciotiempo real. La fuerza de esta línea argumental, vimos, depende de la clasificación de las estructuras espaciotemporales heredadas de la dinámica de Newton. Considero que esto no es correcto. Pero incluso si juzgamos a la métrica desde la perspectiva newtoniana las cosas no quedan muy claras.

El campo métrico de la TGR tiene energía y momento. Resulta más natural pensar que la energía y el momento son cargados por campos físicos materiales. ¿Por qué elevar, entonces, la métrica a la categoría de espaciotiempo real independiente sin más? ¿Dónde ponemos el campo gravitacional? ¿En la materia como todos los demás campos físicos o en las propiedades del espacio? ¿Qué pasa con las ondas gravitacionales y la energía contenida en campos gravitacionales sin fuentes?

Stachel se expresa así en todo este asunto (1993, p. 144):

Several philosophers of science have argued that the general theory of relativity actually supports spacetime substantivalism (if not separate spatial and temporal substantivalisms) since it allows solutions consisting of nothing but a differentiable manifold with a metric tensor field and no other fields present (empty spacetimes). This claim, however ignores the second role of the metric tensor field; if it is there chronogeometrically, it inescapably generates all the gravitational field structures. Perhaps the culprit here is the words 'empty spacetime'. An empty spacetime could also be called a pure gravitational field, and it seems to me that the gravitational field is just as real a physical field as any other. To ignore its reality in the philosophy of spacetime is just as perilous as to ignore it in everyday life.

Estoy de acuerdo con Stachel en que es mejor considerar al campo métrico como un campo físico material pero no sólo porque integre las estructuras del campo gravitacional. En breve volveré sobre esto.

La TGR incorpora esencialmente, geometría, gravedad e inercia en la forma del campo métrico. En la física de Newton, geometría e inercia son cualidades estructurales del espacio, mientras que el campo gravitacional es un campo físico. SS escoge geometría e inercia —o las estructuras cronogeométricas— mientras que Stachel, Rovelli y otros relacionistas escogen el campo gravitacional para enfatizar sus respectivas posiciones. Esto es lo que dice Rovelli al respecto (Rovelli 1997, p. 193):

Einstein's identification between gravitational field and geometry can be read in two alternative ways:

- i. as the discovery that the gravitational field is nothing but a local distortion of spacetime geometry; or
- ii. as the discovery that spacetime geometry is nothing but a manifestation of a particular field, the gravitational field.

The choice between these two points of view is a matter of taste, at least as long as we remain within the realm of nonquantistic and nonthermal general relativity. I believe, however, that the first view, which is perhaps more traditional, tends to obscure, rather than enlighten, the profound shift in the view of spacetime produced by general relativity..

Encuentro convincente la interpretación relacional (ii), pero a estas alturas uno puede imaginarse por qué Rynasiewicz (1996) argumenta que el debate ha caducado, o por qué Saunders (2002) intenta definir un relacionismo neutro en cuanto a la distinción entre materia y espacio. Creo que a pesar de las dificultades rendirse no es un camino acertado y tampoco lo es ignorar la distinción entre materia y espacio.

Recordemos que la Teoría Especial de la Relatividad (TER) tiene básicamente las mismas estructuras —geometría e inercia— que la dinámica de Newton incorporadas a las cualidades del espacio. En este sentido perpetúa la tradición newtoniana. En la TGR las cosas son distintas.

El desencanto de Rynasiewicz y Saunders es comprensible porque, al ser usualmente juzgada desde la tradición newtoniana, la estructura teórica y el papel explicativo del tensor métrico en la TGR no parece permitir una distinción clara para decantar el debate. 'Parece una cuestión de gusto'. La razón, creo, para haber convertido a la interpretación sustancialista en la más tradicional es, tautológicamente, la fuerza de la *tradicición*.

La dinámica Newtoniana, paradigmática de nuestras ideas sobre la materia y el espacio, es entendida como una teoría sustancialista sobre el espacio (y el tiempo). Así que mayoritariamente los físicos, los cosmólogos y los astrofísicos, han tomado a la TGR, siguiendo la usanza newtoniana, como una teoría sustancialista sobre el espaciotiempo. La mayoría de filósofos de la ciencia también han suscrito esta interpretación pero, ante las dificultades presentadas por la ambigüedad en la lectura de la TGR, deben existir mejores argumentos que la inercia histórica.

Es bien cierto que Newton tenía una teoría completa y Leibniz no. Pero liquidar al relacionismo amparándose en la victoria de Newton es puro atavismo gratuito.

Podemos superar esto. Yo propongo el siguiente ejercicio: ¿Qué tal si tomamos por buenas algunas de las premisas relacionales de Leibniz (o Mach)? En este caso, la métrica —el nudo del asunto— ¿qué papel explicativo cumpliría? ¿Estaría bien planteada la elección entre geometría (i) y campo gravitacional (ii) asumida por Rovelli (y prácticamente por todos los participantes del debate R-S en TGR)? ¿Sería la geometría

entendida como una cualidad intrínseca de un espacio real independiente de la materia?

Veamos: Para Leibniz el espacio no es otra cosa que el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes. En este caso, la geometría debe funcionar como una estructura que codifica el conjunto de relaciones métricas entre objetos materiales coexistentes. Pensemos que Leibniz tiene una teoría buena. ¿Sería sano concluir que la geometría *per se* es una entidad relacional pura y por tanto TGR es una teoría relacional? Creo que todo el mundo responderá negativamente a esto. Pero muchos filósofos encuentran muy natural hacer lo propio con la geometría para argumentar una interpretación sustancialista de TGR. En realidad la geometría, sin más, parece neutra en este asunto. Forma parte de las estructuras que sirven al relacionista para codificar relaciones entre objetos materiales o al sustancialista para describir al espacio o al espaciotiempo. En este grupo también cabe la estructura diferencial y topológica de la variedad o inclusive toda la estructura inercial. Utilizar *per se* el papel geométrico, o métrico, o cronogeométrico, del campo gravitacional en TGR como un argumento decisivo en favor de la interpretación sustancialista se cae, desde esta perspectiva, por su propio peso.

La fragilidad de la interpretación sustancialista queda en evidencia. Por su parte el relacionista tiene razones importantes para considerar que el campo métrico es un campo material (energía, momento, campo gravitacional). Parece que la interpretación sustancialista se hubiera olvidado del asunto de fondo: *la naturaleza independiente de las estructuras espaciotemporales que cumplen un cierto papel explicativo en la dinámica.*

El relacionismo ha sido proscrito por la evidencia histórica de que ni Leibniz, ni Mach construyeron una dinámica relacional capaz de rivalizar con la dinámica de Newton. Pero aún así, superada la dinámica newtoniana, la doctrina merece una oportunidad. Que se haya descartado en el contexto de TGR por razones que en el fondo están dictaminadas por la contingencia histórica puede resultar entendible pero no justificable.

De la misma forma en que los sustancialistas han respondido al argumento del agujero reconociendo hábilmente que LE no es una razón fuerte contra el sustancialismo, debían reconocer que por sí solas las estructuras espaciotemporales de la métrica tampoco pueden decantar en forma alguna el debate hacia su costado. Éstas (y su naturaleza independiente) son el objeto de discusión. No pueden funcionar como un argumento decisivo.

Mientras el relacionista tiene buenas razones para juzgar a la métrica como un campo de materia, el sustancialista sofisticado, a mi juicio, no tiene argumentos importantes para rechazar la naturaleza material del campo gravitacional. Este fue bien entendido como un campo físico antes del argumento del agujero. Esto debió tomarse como una buena nota de advertencia, ya que por entonces a casi nadie pareció incomodarle su estructura espaciotemporal para discriminar su naturaleza material.

Si estamos preparados para vencer la inercia histórica y dar una oportunidad a Leibniz y Mach en todo esto, la TGR aparecerá ante nosotros, en su interpretación más natural, como una teoría relacional limpia.

A continuación quiero enfatizar el papel dinámico de la materia. Como veremos, este aspecto importante suele ser ignorado por el sustancialismo en su interpretación del papel de la métrica en la TGR.

4. Objetos dinámicos y conservación de la energía-momento en la TGR

Las variables dinámicas de nuestras teorías están ligadas a propiedades estructurales de la materia. Esta es notablemente una característica distintiva de nuestras teorías físicas. Sin embargo, este consenso es roto por la interpretación sustancialista (SS) de la TGR. Recordemos que un modelo de la TGR (M, g, T) está dado por la variedad M , el campo métrico g , que funciona como un objeto dinámico que debe representar las propiedades del espaciotiempo, y T que, naturalmente, es también un objeto dinámico que representa los contenidos materiales del mismo. Hemos visto que no hay nada contradictorio en hablar de propiedades espaciotemporales relacionadas con la materia. El sustancialista quiere proscribir cualquier estructura espaciotemporal de la materia.

En este sentido el sustancialista quiere que en su teoría los objetos materiales aparezcan separados, limpiamente, de las estructuras espaciotemporales.

Supongamos que puede hacerse la distinción limpia entre objetos espaciotemporales A_i y objetos materiales P_i . En este caso los modelos Π de una buena teoría sustancialista estarán representados de la siguiente forma $\Pi = (M, A_1, A_2, A_3, \dots, P_1, P_2, P_3, \dots)$.

Afortunadamente, como es bien sabido, esta suposición funciona bien para modelos newtonianos, neo-newtonianos, y tipo-Minkowski (TER). La separación entre materia y espacio-tiempo está bien definida en estos casos. Funciona bien si tomamos cualquier ensamble de campos físicos (electromagnéticos, gravitacionales, fluidos de polvo, etc.) inmersos en los respectivos espacios newtoniano, neo-newtoniano o tipo-Minkowski (TER).

En estos casos, hablando en forma bastante general, un modelo puede representarse así:

$$\Pi = (M, h, \Gamma, \Psi, \rho, E, \dots).$$

Donde M es la variedad, h es la estructura métrica, Γ es la conexión afín o estructura inercial, Ψ es el campo gravitacional, ρ es una densidad de fluido que puede representar la distribución de materia ponderable convencional, E es el campo electromagnético y los puntos suspensivos corresponden a cualquier otra forma de materia que queramos incluir en el modelo.

En todos estos modelos pre-TGR, h y Γ son entendidos como propiedades del espacio-tiempo, mientras que Ψ, ρ, E y el resto son objetos materiales. Todo el mundo desearía que las cosas fueran tan limpias cuando pasamos a los modelos de la TGR y que una simple traducción directa de estas estructuras y campos bastara para la identificación, pero allí el tensor g integra simultáneamente los roles de Ψ —un campo físico de materia— y de h y Γ —estructuras espaciotemporales. Así que necesitamos un criterio más fuerte que la simple identificación de estructuras. Aparte del transporte de

energía y momento, común a todos los campos materiales, un criterio conocido viene dado por la naturaleza dinámica de estos objetos.

En los modelos pre-TGR las estructuras espaciotemporales (h, Γ) son entidades absolutas que describen las propiedades del espaciotiempo. Por su parte, toda la materia está representada por objetos dinámicos (Ψ, ρ, E, \dots) . Un objeto absoluto es un objeto que retiene su estructura en todos los modelos de la teoría afectando la evolución dinámica de la materia sin ser recíprocamente afectado. En general los objetos absolutos son caracterizados por su grupo de simetría y el efecto de las correspondientes transformaciones de simetría es producir movimientos o arrastre de los campos dinámicos mientras el fondo absoluto permanece invariante².

En todos los modelos (pre-TGR) del tipo $\Pi = (M, A_1, A_2, A_3, \dots, P_1, P_2, P_3, \dots)$, los A_i s son objetos absolutos, mientras que los P_i s son objetos dinámicos que cambian en correspondencia con sus respectivas ecuaciones de campo.

En los modelos (M, g, T) de la TGR, g y T son objetos dinámicos. Encuentro algo obstinado desconocer la naturaleza material de los objetos dinámicos, común a los modelos de todas nuestras teorías, simplemente para salvar una doctrina ontológica. Sería algo obstinado desconocer la naturaleza material del campo gravitacional. El campo gravitacional es un objeto dinámico material como todos los demás campos de fuerza. La TGR recibe, por tanto, su interpretación natural como una teoría relacional en la que las estructuras espaciotemporales son absorbidas por un campo material g .

La TGR es una teoría dinámica. Todos sus modelos son de la forma $\Pi = (M, P_1, P_2, P_3, \dots)$ ³.

En todo caso la interpretación del campo gravitacional como un campo físico de fuerzas, descansa, en alguna medida en la viabilidad para entenderlo como una entidad portadora de energía-momento, al igual que todos los demás campos. Y aunque casi nadie duda que la energía del campo gravitacional se intercambie libremente con la energía de los demás campos —de hecho se supone que es la fuente de las grandes cantidades de energía liberada en la forma de radiación y calor en la descripción del colapso estelar—, en la TGR, como consecuencia del principio de equivalencia, no se tiene una buena definición local de la densidad de energía del campo gravitacional. Es una asignatura pendiente de resolver en la TGR, estrechamente vinculada con los problemas para cuantizar el campo gravitacional.

De todas formas, que la energía no sea ‘localizable’ en regiones infinitesimales no significa que no exista, al menos, una forma aproximada para hacer estimaciones físicas empíricamente contrastables⁴.

² La distinción entre los objetos absolutos y los objetos dinámicos de las teorías espaciotemporales es originaria de Anderson (1967 p. 83-84) y es bien tratada por Friedman (1983 p. 47-60)

³ Nótese que esta distinción entre objetos absolutos que caracterizan la estructura espaciotemporal —el fondo fijo— y objetos dinámicos —que representan la materia y su evolución— se aplica únicamente a los objetos (campos) que se cuelgan sobre la variedad. La variedad proporciona la estructura topológica y diferencial requerida por estos objetos. Pero no es en sí misma cobijada por la distinción. Su falta de estructura no permite entenderla ni como un espaciotiempo de fondo, en el caso de teorías con variedad absoluta (fija), ni como un objeto material —no es portadora de ningún tipo de interacción, ni tiene la estructura de un campo— en caso de teorías con variedad dinámica (TGR).

Pero se esperaría que al menos una representación del intercambio y conservación de la energía fuese teórica y conceptualmente consistente. Existen problemas. Sin embargo, la opinión más consensuada al respecto indica que la ley de la conservación de la energía (que debe incluir la energía gravitatoria) funciona aceptablemente para espaciotiempos estáticos o asintóticamente planos. La razón, en el fondo, es que estos modelos reproducen cualidades que recuerdan la distribución de campos físicos sobre un soporte espaciotemporal absoluto (sustancialista), típica tanto de la dinámica newtoniana como de la TER.

En el ejemplo canónico de los modelos asintóticamente planos, como resultado del teorema de Noether, las simetrías del espaciotiempo de fondo (en el límite de integración) determinan las leyes de conservación. Por esto, en este caso, la energía-momento global de un sistema aislado puede concebirse como la energía-momento de un sistema físico (material) en un espaciotiempo de Minkowski —el espaciotiempo plano de la TER, donde tenemos buenas leyes de conservación.

Pero considerar esto como el ejemplo paradigmático para hablar de una genuina ley de la conservación de energía-momento en la TGR es conceder demasiado. Lo que se ha hecho es considerar la energía-momento para un sistema aislado en un espaciotiempo casi plano visto desde muy lejos. En estas circunstancias es posible (aproximadamente) romper el campo gravitacional en una fracción absoluta —que representa el espaciotiempo plano de fondo— y una fracción dinámica que funciona como un campo físico desacoplado de la estructura de fondo. Esto puede servir para hacer estimaciones empíricamente contrastables como la energía radiada por un pulsar binario, por ejemplo. Ya estamos acostumbrados a romper la estructura dinámica del campo gravitacional en la TGR mediante el uso de la aproximación de campo débil (Einstein 1916) para todo tipo de predicciones en la TGR. Se puede justificar este tipo de tratamiento cuasi-absoluto del campo gravitacional y el uso respectivo de condiciones de frontera (en el infinito espacial o en el infinito nulo) cuando los modelos de la TGR son usados como herramienta predictiva suficientemente aproximada para situaciones físicamente realistas en regiones limitadas del espaciotiempo. Recuérdese, en este sentido, el uso de las condiciones de frontera en el infinito para predecir el arrastre de los marcos inerciales en el interior de un cascarón o el uso extendido de la métrica de Schwarzschild (que es simétrica y asintóticamente plana) para describir el espaciotiempo en la vecindad de un objeto masivo.

Sin embargo, a nivel conceptual, esto resulta insuficiente para extraer conclusiones bien sea filosóficamente relevantes o suficientemente generales ya que seguramente uno de los rasgos más significativos de la TGR es la naturaleza completamente dinámica del tensor métrico. La ruptura del campo gravitacional tan sólo es posible para una clase muy limitada de modelos y parece poco natural cuando se considera a fondo la repercusión conceptual de la TGR. Sin ir más lejos, incluso cuando se quiere entrar en consideraciones cosmológicas globales, el universo fáctico es usualmente descrito

⁴ Lo que se tiene es una definición cuasi-local (i.e. localizable en regiones finitas del espaciotiempo) de la energía del campo gravitacional para una clase restringida de modelos de la TGR (Szabados 2004) o un pseudotensor que representa la densidad de energía en ciertos sistemas de coordenadas altamente restringidos.

utilizando métricas que no son ni estáticas ni asintóticamente planas, sino del tipo inflacionario Friedmann-Robertson-Walker (FRW).

En parte por todo esto ha existido cierta discusión respecto a la viabilidad tanto de una auténtica ley de la conservación de la energía-momento en la TGR como de una buena definición local de la energía del campo gravitacional. Revisando este asunto, Hofer (2000) concluye que no existe un principio general de la conservación de energía-momento en la TGR. Estoy de acuerdo, pero a mi juicio esto conduce a consideraciones distintas a las suyas en cuanto a las implicaciones de este resultado en lo concerniente al debate R-S. Me inclino a pensar que el colapso de la conservación de la energía-momento en la TGR está fuertemente vinculado con la naturaleza genuinamente relacional de la teoría. En la TGR no tenemos una ley de la conservación de la energía-momento bien definida como consecuencia de que esta teoría no tiene un fondo espaciotemporal independiente. Las leyes de conservación requieren simetrías globales que caracterizan los objetos absolutos y estos típicamente representan la estructura espaciotemporal del fondo, del contenedor físico del sustancialista⁵. Este fondo no existe en la TGR. No tenemos un espaciotiempo independiente para soportar la ley de conservación de la energía-momento.

La descripción estándar de la ley de la conservación de la energía —para el caso restringido de modelos asintóticamente planos— fue inaugurada por Einstein (1916, p. 151) y es usualmente tratada en los libros de texto (Véase especialmente Wald 1984, Cap. 11). Una buena revisión crítica sobre la visión recibida al respecto puede encontrarse en Hofer (2000).

En todo caso, sin entrar en algunos de los pormenores para los cuales remito a las referencias mencionadas, quiero enfatizar mi posición sobre el asunto de la energía del campo gravitacional, el de la conservación de la energía-momento en la TGR, y su repercusión en el debate R-S. Veamos:

⁵ Si bien la ausencia de simetrías globales también está vinculada con la imposibilidad de localizar la energía-momento del campo gravitacional, insisto en que el hecho de que la energía del campo gravitacional no sea localizable no implica la conclusión de que la energía del campo gravitacional no exista. A pesar de que la localidad de la energía de g parece ser una condición necesaria para una buena definición de la ley de conservación respectiva, la realidad de la energía del campo gravitacional es tan aceptada como la realidad de la energía de los demás campos. La materialidad del campo gravitacional depende de la existencia de la energía gravitatoria. De hecho en el contexto de la TGR, no se cuestiona la existencia de la energía del campo gravitacional. Se trabaja intensamente, más bien, en el problema de su localidad o de su representación cuasi-local (Sabados, 2004). En todo caso, en relación con el asunto de la realidad de la energía del campo gravitacional, creo que no sobra mencionar que se ha probado que la energía *total* del campo gravitacional debe ser positiva tanto en el infinito espacial como en el infinito nulo (Goldberg 1980). Y en general se considera que la energía gravitacional se intercambia libremente con la energía de los demás campos e interactúa con la materia condensada, lo cual resulta de importancia en la descripción de un buen número de fenómenos como el colapso estelar y sus enormes cantidades de energía (gravitatoria) radiada, la termodinámica de los agujeros negros, el calentamiento de ciertos objetos estelares como resultado de las mareas gravitacionales y el efecto de las ondas gravitacionales en la dinámica estelar (quásares y púlsares), por citar algunos. En los casos anteriores se utiliza alguna forma de definición cuasi-local de la energía del campo gravitacional.

Al igual que en la dinámica newtoniana, en la TER las leyes de conservación son usualmente presentadas en dos formas equivalentes: una diferencial y otra integral.

La ecuación diferencial nos dice que no se crea energía-momento en una región infinitesimal del espaciotiempo, mientras que la formulación integral extiende esta idea a volúmenes finitos de éste. Las dos formas de presentar la ley de conservación de energía-momento están relacionadas mediante el teorema de Gauss y usualmente se denotan, respectivamente, así:

$$T_{,\nu}^{\mu\nu} = 0, \quad (1.1)$$

$$\int T_{,\mu}^{\mu\nu} d^4V - \int T^{\mu\nu} d^3V \Sigma = 0, \quad (1.2)$$

donde $T^{\mu\nu}$ es el tensor de energía-momento, la coma denota la divergencia ordinaria, la primera integral se realiza sobre un 4-volumen y la segunda sobre una 3-superficie que envuelve el volumen⁶.

Ahora bien, el tensor $T^{\mu\nu}$ representa los usualmente llamados campos de materia, pero no incluye ninguna contribución del campo gravitacional, así que (1.1) y (1.2) funcionan como leyes de conservación en ausencia de gravedad, pero incluso en la dinámica newtoniana debe incluirse la energía del potencial gravitacional para tener leyes de conservación⁷. De modo que para incluir la gravitación en un sistema físico en lugar de (1.1) tenemos la siguiente ley de conservación diferencial:

$$T_{,\nu}^{\mu\nu} = G^{\nu}, \quad (1.3)$$

donde G^{ν} es la densidad de fuerza externa gravitacional.

Escrita de esta forma la ecuación (1.3) es una expresión diferencial local para el intercambio entre la energía-momento gravitacional y la energía-momento contenida en los demás campos de materia. Evidentemente el teorema de Gauss también permite la correspondiente expresión integral para representar la misma situación en un volumen finito del espaciotiempo. Nos gustaría tener el mismo tipo de ‘buenas leyes de conservación’ en la TGR, pero el problema es que en la TGR esta correspondencia general entre la ley de conservación local diferencial y su representación integral se rompe. Veremos por qué. La TGR relaciona curvatura con gravedad, y puede decirse que en regiones infinitesimales el espaciotiempo parece plano. Por lo tanto en la TGR habitualmente la ley de conservación diferencial infinitesimal puede bien escribirse así:

⁶ Estrictamente hablando T es el tensor *tensión-energía* que representa la distribución de tensiones, presiones y energía de los campos de fuerza, pero al integrar como en (1.2) se obtiene el flujo del vector energía-momento del campo a través de la superficie que limita el hipervolumen tetradimensional V (véase especialmente Misner, Thorne y Wheeler (1973), cap. 7).

⁷ En este caso la energía del potencial gravitacional no es localizable, aunque funciona al menos como mecanismo de balance de contabilidad.

$$T_{;v}^{\mu\nu} = 0, \quad (1.4)$$

donde el punto y coma representa la derivada covariante.

Nótese que esta suele ser tomada como una buena expresión del principio de equivalencia entendido como la regla habitual de *convertir comas en puntos y coma*, es decir de convertir las derivadas ordinarias de la TER en derivadas covariantes en la TGR para buscar la ecuación correspondiente, como bien ocurre aquí al comparar (1.1) de la TER y (1.4) de la TGR.

Sin embargo, a pesar de la elegante correspondencia entre (1.1) de la TER y (1.4) de la TGR, es justo recordar que (1.1) es una ley de conservación diferencial en ausencia de gravedad. Aquí empiezan las dificultades. La TGR es una teoría de gravitación donde las componentes métricas —el fondo en la TER— no están desacopladas del campo gravitacional, así que (1.4) es tomada, más bien, como una representación del intercambio infinitesimal entre energía-momento del campo gravitacional y los demás campos al estilo de (1.3). Esto se ve mejor cuando escribimos (1.4) explícitamente así:

$$T_{;v}^{\mu\nu} = T_{,v}^{\mu\nu} + \Gamma_{\alpha v}^{\mu} T^{\alpha\nu} + \Gamma_{\alpha v}^{\nu} T^{\mu\alpha} = 0, \quad (1.5)$$

Donde los $\Gamma_{\alpha v}^{\mu}$ son las componentes de la conexión afín que expresan la contribución del potencial gravitacional.

En todo caso para que efectivamente (1.5) funcione como una ley de conservación que proporciona una representación general del balance local del intercambio de energía-momento entre el campo gravitacional y los demás campos, se esperaría que, a su vez, en la TGR tuviéramos teóricamente bien definidas dos cosas:

- A) una expresión equivalente, ya no del intercambio infinitesimal de energía-momento, sino del intercambio para regiones finitas del espaciotiempo o de la conservación global de estas cantidades.
- B) una expresión explícita de la distribución local de energía-momento del campo gravitacional $g_{\mu\nu}$.

En primer lugar A no funciona porque para esto se requeriría una extensión del teorema de Gauss aplicable al espaciotiempo dinámico de la TGR. Típicamente el teorema de Gauss es enunciado como la equivalencia entre el flujo de una cantidad (vectorial) a través de una superficie cerrada y la integral de la divergencia de la misma cantidad a través del volumen encerrado por esta superficie. En el caso de la TER y la TGR la divergencia mide el flujo del vector energía-momento en regiones infinitesimales. Pero, para tener una medida finita de este flujo de energía-momento lo que se hace es sumar las contribuciones infinitesimales (integrar) y el procedimiento implica comparar vectores definidos en regiones distantes del espaciotiempo. En la TER no hay problema, se tiene un espaciotiempo absoluto de fondo cuyas simetrías permiten la comparación ‘distante’ de vectores pero en la TGR, con su espaciotiempo curvo dinámico, esto no es así.

En regiones infinitesimales el problema es resuelto utilizando el transporte paralelo —la divergencia covariante funciona— pero para contabilizar la contribución del flujo del vector de energía-momento en un 4-volumen finito el procedimiento dependería explícitamente del camino de transporte paralelo. No existe una extensión del teorema de Gauss aplicable a la TGR y por tanto la formulación integral para la conservación-intercambio de la energía-momento al estilo de (1.2) no está bien definida en esta teoría.

En teorías con espaciotiempos absolutos (en el sentido sustancialista) las simetrías permiten hacer una comparación remota de objetos (campos) dinámicos como el representado por el vector energía-momento. Esto es, se cuenta con transformaciones que permiten llevar o arrastrar campos dinámicos sin que el espaciotiempo absoluto de fondo se altere. El problema en la TGR es que la estructura espaciotemporal está integrada en un objeto dinámico y por tanto —en los casos más generales— no existen transformaciones que dejan dicha estructura (métrica) invariante. Aquí quiero hacer una observación: En teorías con espaciotiempo independiente dichas transformaciones producen el efecto de arrastrar o mover los campos *materiales*. Mi impresión es que en la TGR se sigue la misma línea argumental, dichas transformaciones arrastran los objetos materiales, pero en la TGR esto es todo lo que hay. No existe un espaciotiempo físico independiente de la presencia de objetos materiales. La estructura métrica se ha materializado, por decirlo de alguna manera, de la mano del campo gravitacional.

Creo que este es un argumento fuerte para entender mejor la naturaleza material del tensor métrico en la TGR. La única razón que podría tener algún peso para intentar desechar su naturaleza material, creo, es el hecho de que este campo integre estructuras espaciotemporales como la estructura métrica e inercial. Pero, insisto, también creo que éstas pueden ser entendidas, incluso en la dinámica clásica, como estructuras relacionales y por tanto su presencia es neutral en cuanto a las implicaciones en el debate R-S⁸. Más bien, a mi juicio, la interpretación sustancialista tendría que justificar de algún modo la existencia de estructuras espaciotemporales independientes del campo gravitacional en la TGR.

El espacio (y el tiempo) newtoniano podía pensarse sin la presencia de ningún objeto material. Removida la materia éste conservaba toda la riqueza de su estructura espaciotemporal. Este no es el caso en la TGR. Ni siquiera la variedad retiene algún tipo de significado espaciotemporal sin la presencia del campo gravitacional. Todo es materia en la TGR y, por tanto, el espaciotiempo no reclama —ni siquiera teóricamente— existencia independiente. En definitiva la TGR recibe, a mi juicio, su interpretación natural como una teoría genuinamente relacional sobre el espaciotiempo. Esta fue, también, la conclusión madura de Einstein (véase Einstein 1954, Appendix V, p. 155)⁹.

⁸ Me refiero a las teorías alternativas a la dinámica clásica construidas por Barbour y Bertotti (1977, 1982). Pretendo tratar, en forma detallada, las implicaciones de las mismas en el debate R-S en un estudio ulterior.

⁹ Deseo agradecer a dos revisores científicos anónimos quienes contribuyeron con pertinentes observaciones para mejorar la forma y la presentación de este artículo.

REFERENCIAS

- Anderson, J.L. (1967). *Principles of Relativity Theory*. New York: Academic Press.
- Barbour, J.B., y B. Bertotti (1977). "Gravity and Inertia in a Machian Framework", *Il Nuovo Cimento B*, 38, pp. 1-27.
- (1982). "Mach's principle and the Structure of Dynamical Theories", *Proceedings of the Royal Society* 382, pp. 295-306.
- Belot, G. (1996). "Why General Relativity Does Need an Interpretation", *Philosophy of Science (Proceedings)* 63, pp. 80-88.
- y J. Earman (2001). "Pre-Socratic Quantum Gravity", en C. Callender y N. Hugget (eds.), *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, Cambridge: Cambridge University Press, pp. 213-255.
- Brighouse, C. (1994). "Spacetime and Holes", en *PSA* 1994, Vol. 1, D. Hull, M. Forbes y R. Burian (eds.). Michigan: East Lansing Michigan, pp. 117-125.
- Butterfield, J., e Isham, C.J. (1999). "On the Emergence of Time in Quantum Gravity", en J. Butterfield (ed.), *The Arguments of Time*, Oxford: Oxford University Press, pp. 111-168.
- DiSalle, R. (1994). "On dynamics, indiscernibility, and spacetime ontology", *British Journal for the Philosophy of Science* 45, pp. 265-287.
- Earman, J. (1986). *A Primer on Determinism*, Dordrecht: Reidel.
- (1970). "Who's Afraid of Absolute Space", *Australasian Journal of Philosophy* 48, pp. 287-317.
- (1989). *World Enough and Space-Time*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- y J. Norton (1987). "What Price Space-Time Substantivalism? The Hole Story", *British Journal for the Philosophy of Science* 38, pp. 515-525.
- Einstein, A. (1913a). "Physikalische Grundlagen einer Gravitationstheorie", *Naturforschende Gesellschaft Vierteljahrschrift* 58, pp. 284-290.
- (1916b). "Physikalische", *Zeitschrift* 17, pp. 101-104.
- (1954). "Relativity and the Problem of Space", Appendix 5, *Relativity: The Special and General Theory*. 15th edition. Methuen.
- Friedman, M. (1983). *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton: Princeton University Press.
- Goldberg, J.N. (1980). "Invariant transformations, conservation laws, and energy-momentum", en A. Held (ed.), *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years After the Birth of Albert Einstein*, Vol. 1. New Cork: Plenum Press., pp. 469-489.
- Hawking, S.W., y G.F.R. Ellis (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hofer, C. (1996). "The Metaphysics of Space-Time Substantivalism", *The Journal of Philosophy*, 93, pp. 5-27.
- (2000). "Energy Conservation in GTR", *Studies for the History and Philosophy of Modern Science* 31 (II), pp. 187-199.
- Kretschman, E. (1917). *Annalen der Physik* 53, pp. 576-591.
- Misner, C.W., K.S. Thorne y J.A. Wheeler (1973). *Gravitation*. San Francisco: W.H. Freeman.
- Mundy, R. (1992). "Space-Time and Isomorphism", en *PSA* 1992, Vol. 1, D. Hull, M. Forbes y K. Okruhlik (eds.). Michigan: East Lansing Michigan, pp. 515-527.
- Pooley, O. (2002). "Relationism Rehabilitated? II: Relativity", e-print en <<http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000221>>.
- Reichenbach, H. (1957). *Space and Time*. New York: Dover. [1928]
- Rovelli, C. (1996). "Relational Quantum Mechanics", *International Journal of the Theoretical Physics* 35, pp. 1637.
- (1997). "Halfway through the Woods: Contemporary Research on Space and Time", en J. Earman y J. Norton (eds.), *The Cosmos of Science: Essays of Exploration*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 180-223.
- Rynasiewicz, R. (1996). "Absolute Versus Relational Space-Time: An Outmoded Debate?", *Journal of Philosophy* 93, pp. 279-306.
- Saunders, S. (2002). "Indiscernibles, General Covariance, and Other Symmetries: The Case for Non-Reductive Relationism", en J. Renn (ed.), *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics*, Dordrecht: Kluwer Press.

- Smolin, L. (1991). "Space and Time in the Quantum Universe", en A. Ashtekar y J. Stachel (eds.), *Conceptual Problems of Quantum Gravity*, Boston: Birkhauser. pp 228-291.
- Stachel, J. (1993). "The Meaning of General Covariance", en J. Earman, A. Janis, G. Massey y N. Rescher, (eds.), *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*, Pittsburgh: Pittsburgh University Press, pp. 129-160.
- Stein, H. (1970). "Newtonian space-time", en *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton 1666-1966*. Cambridge, Mass: The MIT Press, pp. 258-284.
- Szabados, L.B. (2004). "Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article", *Living Rev. Relativity* 7, p. 4.
- Wald, R.M. (1984). *General Relativity*. Chicago: University of Chicago Press.

Favio Ernesto CALA VITERY es Profesor Titular del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad de Bogotá 'Jorge Tadeo Lozano'. Ha trabajado en historia de la ciencia del siglo XVII, pero su trabajo reciente se centra en el desarrollo de la cosmología relativista y la interpretación del espacio-tiempo. Ha publicado "La Cuestión 31 de la Óptica o el Programa de las Fuerzas en la Filosofía Mecánica" (Sao Paulo, 2006) y "De la relatividad de la inercia al universo cerrado" (Colombia, 2007), entre otros.

DIRECCIÓN: Universidad de Bogotá 'Jorge Tadeo Lozano', Departamento de Ciencias Básicas, Carera 4 No. 23-61, Bogotá, Colombia. E-mail: favio.cala@utadeo.edu.co.