

## **Kant y la relatividad. Sobre la idea de una “ontología de la experiencia”**

Gilberto Castrejón<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Profesor Titular, Departamento de Formación Integral e Institucional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional. Dirección: Av. IPN, no. 2580, col. La Laguna Ticomán, Gustavo A. Madero, Cd. de México, C.P. 07340. E-mail: gcastrejon@ipn.mx. Tel. (55) 57296000 ext. 56912.

**Resumen:** La teoría de la constitución de objetos de experiencia fue planteada por Kant en la *Crítica de la Razón Pura*, y complementada en los *Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza* para el caso específico de la física de Newton. Así, a partir de una lectura de esta última obra, pretendo mostrar, primeramente, que tal método de constitución fundamentaría lo que he llamado una “ontología de la experiencia”, la cual está conformada por condiciones epistemológicas, marcos epistémicos (*frameworks*) y condiciones materiales (instrumentos de medida); y tal que, metodológicamente, dicha constitución de objetos se lleva a cabo mediante un “círculo kantiano de auto-consistencia”. Asimismo, identificaré la existencia de una “ontología de la experiencia” en la relatividad general, en relación con los test clásicos de dicha teoría, y en atención a ciertos aspectos que permitan dar respuesta a la cuestión que, si bien es extraña al kantismo, aun así es legítima: ¿qué son el espacio y el tiempo en la experiencia? pues dicha teoría de la física moderna es la que precisamente nos da noción de la naturaleza y estructura del espacio y el tiempo. Como podré concluir: Kant y su epistemología tienen cierta vigencia en la relatividad general; los aspectos teóricos y experimentales de esta teoría lo corroboran.

**Palabras Clave:** Kant, espacio, tiempo, física newtoniana, relatividad general, “ontología de la experiencia”.

**Abstract:** The theory of the constitution of objects of experience was raised by Kant in the *Critique of Pure Reason*, and complemented in *Metaphysical Foundations of Natural Science*, specific case of Newton’s physics. Thus, begin-

ning by reading this work, I attempt to show, firstly, that this method of constitution would form the base of what I have called “ontology of experience” is shaped by epistemological conditions, frameworks and material conditions (measuring instruments), and such that, methodologically, this constitution of objects is performed through a “Kantian circle of self-consistency”. Likewise, I will be able to identify an “ontology of experience” in general relativity, in relation to classical tests of this theory, and in relation to some aspects of a possible answer to a question, although strange in Kant, it is legitimate: what are space and time, in experience? This theory of modern physics shows precisely the nature of space and time, in terms of space-time entity. As I will be able to conclude: Kant’s epistemology has validity in general relativity, this is corroborated by theoretical and experimental aspects of this theory.

**Key Words:** Kant, space, time, Newtonian physics, general relativity, “ontology of experience”.

Este trabajo ha sido también posible gracias al apoyo del CONACYT.

Un experimento de física no es solamente la constatación de un conjunto de hechos, sino también la traducción de esos hechos a un lenguaje simbólico, por medio de reglas tomadas de las teorías físicas.

Pierre Duhem  
*La teoría física*

## Introducción

¿Cómo se constituyen los objetos de experiencia en la ciencia?, ¿obedece dicha constitución a ciertos aspectos teóricos, cognitivos y materiales, en conjunción, los cuales conforman a su vez un conjunto de elementos básicos, independientemente de las características de la teoría que se desea verificar experimentalmente?, ¿qué podemos colegir en el caso de la física moderna a partir de las propuestas de Kant sobre la manera de constituir objetos de experiencia? Generalmente, se cree que si existe una diferencia epistemológica entre teorías, el carácter empírico de éstas puede que cambie, en el sentido de cómo se establecen las condiciones experimentales, de objetividad, que cada teoría trae a colación. En este sentido, pretendo llevar a cabo un análisis sobre las condiciones para constituir objetos en física, en relación con la mecánica

newtoniana y con la relatividad general, de tal forma que pueda mostrar que ambas obedecen a lo que aquí llamaré una “ontología de la experiencia”<sup>1</sup> de carácter kantiano, pues toda verificación experimental, de una u otra teoría, apela a ciertos elementos básicos que involucran elementos teóricos (*frameworks*), epistemológicos y materiales; y en donde dichos elementos, en conjunto, definen una “ontología de la experiencia”, es decir, que ésta tiene que ver con establecer condiciones de objetividad.

En atención a lo anterior, remitiéndome a Pierre Duhem (1914/2003), éste ha señalado varios aspectos específicos con respecto al carácter experimental de la física<sup>2</sup>. Así, el autor considera dos aspectos fundamentales para llevar a cabo todo experimento de física, los cuales, considero, resultan también aplicables al caso de la física moderna:

- Hay un conjunto de observaciones de ciertos fenómenos, lo que precisamente fundamenta lo que se entiende por “observador”.
- Dichas observaciones deben ser susceptibles de *interpretarse*, lo cual sólo puede ser posible si dicha interpretación se sustenta en una teoría o teorías aceptadas.

Con esto, es preciso señalar que dichas condiciones permiten a su vez constituir *objetos*, los cuales obedecen a ciertos aspectos propios de la teoría que ha de verificarse experimentalmente, con lo que es posible afirmar que dichos objetos constituyen una ontología, es decir, un conjunto de objetos postulados como existentes por la teoría, y que junto con la verificación experimental, conjugan ciertos elementos cognitivos, teóricos y materiales, es decir, definen lo que aquí llamaremos una “ontología de la experiencia”.

---

<sup>1</sup> Cfr. “La deducción de las categorías permite fundamentar la metafísica «en su primera parte, que se ocupa con conceptos a priori, cuyos objetos correspondientes pueden darse en la experiencia de un modo ajustado a ellos». Kant reserva para esta primera parte de la metafísica el nombre clásico de ontología, de la que dice que constituye «un sistema de todos los conceptos y principios del entendimiento, pero sólo en cuanto conciernen a objetos que pueden presentarse a los sentidos y que, en consecuencia pueden ser corroborados por la experiencia». Esta ontología, claro está, debe deponer su vieja pretensión de suministrar conocimientos a priori sobre las cosas en general y como tales: no puede ser una doctrina del ente en cuanto ente, sino del ente en cuanto experimentable por el hombre.” (Torretti, 1967: 418). Sólo pretendo especificar precisamente el sentido de lo que habremos de entender por “ontología”, en términos de un «sistema de objetos susceptibles de ser experimentables», los objetos mismos de la ciencia.

<sup>2</sup> En la literatura de filosofía de la ciencia, suele asociarse la figura de Duhem a una concepción convencionalista a la Poincaré (1952), o incluso a la visión holística de la experiencia desarrollada por Quine, sobre todo en su famoso artículo: “Dos dogmas del empirismo” (1950); me he remitido a Duhem únicamente en cuanto a su idea sobre el carácter experimental de la física, desarrollado en su obra *La teoría física*. Finalmente, no pretendo entrar en controversia con sus ideas, acaso incluso el tipo de controversias tratadas por Adolf Grünbaun (1973) en su obra clásica *Philosophical Problems of Space and Time*.

Ahora bien, como bien menciona Duhem:

“Un experimento físico es la observación precisa de un grupo de fenómenos acompañada de la *interpretación* de esos fenómenos. Esta interpretación sustituye los datos concretos obtenidos realmente de la observación por representaciones abstractas y simbólicas que les corresponden en virtud de las teorías admitidas por el observador” (Duhem, 1914/2003: 193).

Precisamente, la interpretación de los datos experimentales ha de llevarse a cabo en atención a la o las teorías vigentes, es decir, que existe una interdependencia entre los procedimientos experimentales y la o las teorías que han de verificarse, aunado a las condiciones materiales: los aparatos de medida, que también son interdependientes de las leyes físicas por las que se rige una determinada teoría. Esto nos llevaría a identificar que la manera en que se establecen las condiciones de experiencia (condiciones de objetividad), propias de una teoría, obedece a un conjunto de elementos como las condiciones teóricas de la teoría (que postula objetos), condiciones cognitivas (en relación con lo que se denomina “observador”) y las condiciones materiales (instrumentos de medida), conformando a su vez las condiciones de objetividad.

Así, en el primer apartado presentaré una sucinta revisión de la teoría kantiana de la constitución de objetos de experiencia en relación con la física newtoniana y, atendiendo a cómo la objetividad comienza con establecer criterios específicos de objetividad, fundamentando lo que he llamado una “ontología de la experiencia”, a partir de establecer un esquema metodológico de la constitución de objetos de experiencia, en términos de un “círculo kantiano de autoconsistencia”.

En el posterior apartado, trataré los aspectos teóricos y experimentales de la relatividad general, en relación con los criterios de objetividad (marcos epistémicos o *frameworks*, condiciones formales y materiales). Y a su vez, fundamento la cuestión: ¿qué son el espacio y el tiempo como *objetos* de experiencia? De aquí se podrá dar una respuesta a la cuestión planteada.

Finalmente, podré concluir, entre otras cosas, que tanto en la física de Newton como en la relatividad general, los objetos que postulan dichas teorías se constituyen mediante una “ontología de la experiencia” de carácter kantiano.

### **Kant y la constitución de objetos de experiencia**

En la *Crítica de la Razón Pura*, Kant ha podido establecer las bases para configurar una “teoría de la constitución de objetos de experiencia”<sup>3</sup> de carácter general; así, para el caso que nos interesa, el método kantiano para constituir objetos de experiencia en física fue especificado propiamente en los *Principios*

---

<sup>3</sup> Para Kant, los objetos de toda posible experiencia son constituidos mediante la aplicación de las categorías a lo múltiple dado a las formas puras de la sensibilidad (espacio y tiempo).

*Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza* (*Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, MAN<sup>4</sup>), en dicha obra, pretende Kant explicar cómo se aplican las categorías a la constitución de objetos de experiencia, es decir, trata de dar sustento trascendental a la física de Newton, para lo cual divide la obra en cuatro partes:

- 1er capítulo: Foronomía. Donde se define al movimiento de la materia como un *quantum* (categorías de la cantidad).
- 2º capítulo: Dinámica. El movimiento es considerado como perteneciente a la cualidad (categorías de la cualidad).
- 3er capítulo: Mecánica. Aquí se considera el movimiento de la materia con respecto a otros cuerpos (categorías de la relación).
- 4º capítulo: Fenomenología. Se considera al movimiento o reposo de la materia con respecto a la modalidad (categorías de la modalidad).

Cabe aclarar que Kant da un conjunto de definiciones en cada capítulo, de manera que en la foronomía, que contiene los principios de aplicación de las categorías de la cantidad (unidad, pluralidad, totalidad) a la materia en movimiento, se establecen cinco definiciones. Basta mencionar que la foronomía sólo se refiere a la posibilidad de los movimientos rectilíneos, por algo puede considerarse como la teoría pura de la cantidad (*mathesis*) de los movimientos. Asimismo, en la foronomía (IV, 480), Kant define varios tipos de espacios:

- Espacio material, móvil o relativo (espacio físico).
- Espacio absoluto<sup>5</sup>, donde es pensado todo movimiento.

Lo que precisamente me interesa resaltar aquí, con respecto al espacio material o físico, es la idea de Kant en relación con la geometría, dada en una nota del prefacio:

La esencia es el principio primero e interior de todo lo que pertenece a la posibilidad de una cosa. Por lo tanto, uno puede atribuir a las figuras geométricas sólo una esencia, pero no una naturaleza (puesto que en su concepto no es pensado nada que exprese una existencia [Dasein]) (IV, 467).

Así, a diferencia de lo que la mayoría de los intérpretes concibe, puede entenderse que Kant considera al espacio geométrico como aquel que permite llevar a cabo una representación estructurada del espacio material o físico,

---

<sup>4</sup> Las referencias a esta obra corresponden a la traducción de Samuel Nemirovsky: *Primeros Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza*.

<sup>5</sup> Este espacio, propio de la física newtoniana, es considerado por Kant como una “idea de la razón”. Cfr. “Kant firmly rejects the Newtonian conception of absolute space as an actual “object of experience”, and he suggests, instead, that it can be conceived along the lines of what he himself calls an “idea of reason.” In this sense, “absolute space” signifies nothing but an indefinitely extended sequence of ever larger “relative spaces”, such that any given relative space in the sequence, viewed initially as at rest, can be then viewed as moving with respect to a still larger relative space found later in the sequence.” (Friedman, 2010: 243).

pero no está precisamente postulando la existencia de una estructura espacial geométrica (euclidiana) única, y tal que corresponde a la naturaleza del espacio físico, pues resulta relevante diferenciar entre el espacio como condición subjetiva (intuición pura), es decir, la idealidad del espacio<sup>6</sup>, vista en la Estética Trascendental, y el espacio como entidad física. Por tanto, habría que entender que el espacio material o relativo sólo es aquel donde puede identificarse el movimiento de la materia, por medio de una representación geométrica. De aquí ciertas concepciones de neokantianos como la de Cassirer (1923/2012) que habla de una “función de espacialidad”, y tal que a su vez, puede concebirse a la geometría euclidiana como una “idea de la razón” (Friedman, 2010). En este último sentido, y a la par de los trabajos de ciertos neokantianos como Poincaré (1952), no es posible entender a la intuición pura de Kant, como “una representación estructurada”, es decir, que la estructura de la intuición espacial, es *necesariamente* euclidiana.

Ahora bien, en el capítulo 2 de MAN, la dinámica, Kant define a la materia no en términos de su mera existencia y movimiento (como en la foronomía) sino como aquello que llena un espacio y en relación con una fuerza motriz específica, a la vez de que implica la capacidad de un cuerpo a resistir un movimiento en un espacio. Por lo que con la dinámica quedan establecidas las condiciones por las que las llamadas “categorías matemáticas”, es decir, “principios constitutivos”<sup>7</sup>, se aplican a los objetos de experiencia.

Las posteriores categorías, las llamadas por Kant “categorías dinámicas”, se refieren a la existencia de objetos, y son precisamente las que dan sustento a las leyes de la naturaleza, específicamente las tres leyes de Newton. Por tanto, en el capítulo 3 de MAN, Kant fundamenta, en relación con las tres analogías de la experiencia, las tres leyes de Newton: la primera analogía (la permanencia de la substancia) está relacionada con la primera ley de Newton (ley de la inercia); la segunda analogía (ley de la causalidad) con la segunda ley de Newton (la fuerza como causa del movimiento); y la tercera analogía con la tercera ley de Newton (acción-reacción). De aquí que Kant establezca dos definiciones, dejando los teoremas del 2 al 4 para definir las leyes de Newton, respectivamente. Así, Kant considera que las tres leyes de Newton

---

<sup>6</sup> En mi artículo: “La idealidad del espacio en Kant y las geometrías no euclidianas”, (2013), he mostrado que la idealidad del espacio no depende de la validez de cualquier geometría, al aplicarse al análisis del espacio físico, y a su vez, he tratado ciertos aspectos sobre el concepto de intuición pura *a priori*, y su relación con las geometrías no euclidianas, en tanto que, al identificar distintos sentidos de intuición (pura, formal, empírica...), puede verse que la intuición espacial, en sentido kantiano, se “encuentra en la base de cualquier geometría”, y a su vez, la geometría euclidiana resulta ser “la condición de posibilidad de las geometrías no euclidianas”. En este último sentido puede verse también el artículo “Geometry as an object of experience: Kant and the missed debate between Poincaré and Einstein” de Shahen Hacyan (2008).

<sup>7</sup> Estos principios permiten aplicar, por ejemplo, la matemática a los fenómenos, es decir, bajo reglas *a priori*.

ilustran la aplicación de los principios tratados en las analogías de la experiencia, lo cual nos llevaría a identificar a su vez que está considerando a las tres leyes de Newton como “principios regulativos en la constitución de objetos de experiencia”<sup>8</sup>, es decir: “Las analogías de la experiencia y los postulados del pensamiento empírico ofrecen reglas acorde a las cuales la experiencia puede ser organizada” (Caygill, 2009: 129), pues los principios regulativos han de ser reglas que orientan al entendimiento. En relación con las leyes de Newton, éstas son las que guían la constitución de objetos en la experiencia, pues permiten tener un control de éstos, es decir, constituyen principios fundamentales *a priori*, y que permiten establecer criterios específicos de objetividad, pero que a su vez fungen como principios constitutivos en la física de Newton, pues permiten constituir objetos.<sup>9</sup>

Finalmente, en el capítulo 4, Kant establece lo concerniente a la fenomenología: el cómo la materia como móvil puede ser objeto de una experiencia; no obstante sólo establece una definición y tres teoremas. Cabe señalar que en la fenomenología, Kant analiza al movimiento en relación con las categorías de la posibilidad, la existencia y la necesidad, y justamente cada teorema pretende explicar cómo es que dichas categorías se aplican, respectivamente, a la constitución de los objetos de experiencia (fenómenos). Así, si se ha de hablar del movimiento de los objetos, éstos deben considerarse como reales en tanto fenómenos, y tales movimientos, regidos por las leyes de la mecánica, son reales porque son objetos de experiencia en un espacio determinado (material o relativo), el cual es representado por una determinada estructura geométrica.

Por tanto, es factible afirmar que el método kantiano de la constitución de objetos de experiencia, planteado en la *Crítica de la Razón Pura*, fue complementado en *Los Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza (MAN)*,

---

<sup>8</sup> Cfr. “Una analogía de la experiencia será, entonces, sólo una regla según la cual, de las percepciones, ha de surgir la unidad de la experiencia (no como [si fuera] ella misma una percepción, [entendida] como intuición empírica en general); y como principio valdrá para los objetos (para los fenómenos) no *constitutivamente*, sino sólo // *regulativamente*.” <A180>[B223] Resulta un tanto controversial esta parte de la *KrV*, y de la misma obra de Kant, ya que parecería que por una parte las analogías poseen un carácter regulativo, pero por otro, constitutivo; en términos generales, aquí entendemos que en el contexto de una teoría de la física existen ciertos principios que resultan ser constitutivos del objeto de experiencia, y ésta es precisamente la función de las leyes de Newton; las analogías de la experiencia, si bien las vincula Kant a dichas leyes, como se menciona en la cita, son regulativas como principios para constituir objetos habrá que remitirnos a principios propios de cada teoría en particular, los cuales habrán de ser considerados “*a priori* en el contexto de la teoría”.

<sup>9</sup> Cfr. “En la “Analítica trascendental” hemos distinguido entre los principios *dinámicos* del entendimiento, [que son] principios meramente regulativos de la *intuición*, y los [principios] *matemáticos*, que son constitutivos con respecto a ésta. A pesar de esto, las mencionadas leyes dinámicas son, ciertamente, constitutivas con respecto a la *experiencia*, puesto que hacen posibles *a priori* los conceptos, sin los cuales no tiene lugar experiencia alguna.” <A664>[B692]

específicamente en esta última obra para el caso de la física newtoniana. También, como Peter Mittelstaedt (1994, 2009) ha señalado, tal método de constitución de objetos de experiencia llega a ser aplicable literalmente al caso de la física newtoniana y, como veremos, con ciertas restricciones, al caso de la relatividad general. Ahora bien, para Kant, los objetos de toda posible experiencia son constituidos mediante la aplicación de las categorías a lo múltiple dado a las formas puras de la sensibilidad, de tal manera que un objeto de experiencia se constituye mediante la síntesis de la apercepción que involucra a las intuiciones puras (espacio y tiempo) y a los conceptos puros del entendimiento (categorías)<sup>10</sup>, lo que permite identificar que

“La constitución de ‘objetos de experiencia’ para nuestras percepciones y observaciones comienza con el requerimiento de *objetividad*. Las cualidades observadas podrían no referirse al sujeto perceptor, pero sí a la objetiva realidad externa, la cual es claramente distinguida del sujeto” (Mittelstaedt 2009: 171).

Cabe señalar que los objetos de experiencia son espacio-temporales y se constituyen, para el caso de la física newtoniana, mediante la aplicación de las categorías de relación (substancia, causalidad y comunidad) a la vez del principio de determinación e individualidad, los cuales precisamente corresponden a las precondiciones necesarias, principios formales y *a priori* (cognitivos), que a su vez sustentan los aspectos dinámicos y permanentes de los objetos en términos de las leyes de la naturaleza<sup>11</sup>.

Aunque en el caso preciso de la física de Newton, para que un objeto sea individualizado, y pueda ser distinguido de otros, es factible extender el apego a las precondiciones formales junto con lo que puede llamarse “precondiciones materiales” de la experiencia, las cuales corresponden a las posibilidades materiales que hacen posible una observación<sup>12</sup>, y además, a predicar sobre los objetos individuales a pesar de no formar parte del proceso de cognición. Dichas precondiciones materiales de la experiencia tienen que ver con las leyes físicas de los aparatos de medida. Con esto último, podemos establecer lo que

---

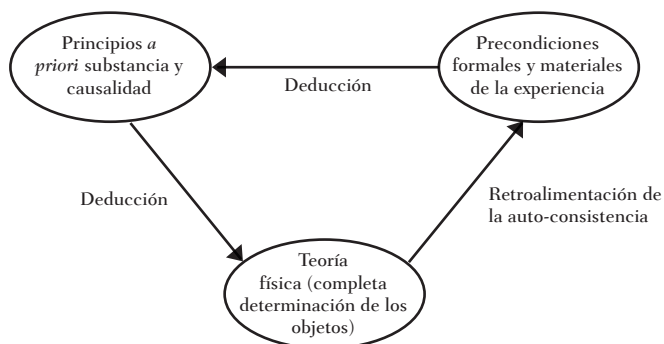
<sup>10</sup> Intuiciones y categorías constituyen los elementos básicos para “experimentar objetos”, es decir, lo que en la mayoría de los intérpretes se entiende por “metafísica de la experiencia”, el sistema de los principios a los cuales todo objeto de experiencia está sometido. En nuestro caso, hemos omitido recurrir a dicho término, introduciendo el de “ontología de la experiencia”, dado que resulta más preciso y, a su vez, más amplio, ya que introduce como elemento lo referente a los “aparatos de medida”. Estos constituyen tanto elementos fundamentales como un papel “activo” en la constitución de objetos de experiencia, sobre todo en la física moderna. Para identificar con precisión el concepto de “metafísica de la experiencia”, puede verse Strawson (1966).

<sup>11</sup> En la física newtoniana, resulta claro el hecho de que las leyes de la naturaleza bajo las cuales están diseñados los aparatos de medida son las mismas leyes que rigen la teoría, por lo que existe una condición de auto-referencia, que no afecta la interpretación de los datos experimentales, y tal que el criterio de objetividad resulta evidente.

<sup>12</sup> A diferencia de la física moderna, en física clásica no se considera que los instrumentos de medida jueguen una “papel activo” en la constitución de los objetos de experiencia, pues se da por



se llamaría “el círculo kantiano de auto-consistencia en física newtoniana”<sup>13</sup> (Mittelstaedt, 2009):



Ahora bien, dado que la física newtoniana es una teoría determinista<sup>14</sup>, los aparatos de medida están sujetos a leyes causales, y conjuntamente, un objeto, al estar plenamente individualizado, es permanente, inalterable en el tiempo. Por lo que, de acuerdo con Kant, las leyes de sustancia y causalidad<sup>15</sup> poseen un carácter *a priori* para la constitución de todo objeto de experiencia, lo cual es completamente verificado para el marco epistémico de la física de Newton, que asimismo se complementa considerando un marco espacial euclidiano y, como se ha señalado, este último concebido sólo como una representación estructurada del espacio material o relativo (espacio físico). Se identifica por tanto que en la física de Newton, para constituir objetos de experiencia, se comienza con establecer criterios de objetividad, los cuales tienen que ver con condiciones formales y materiales, a la vez de marcos epistémicos. Por lo que si puede hablarse de una “ontología de la experiencia” de carácter kantiano en la física newtoniana, ésta contempla:

---

hecho que éstos no afectan los resultados de los experimentos, simplemente porque las leyes de los aparatos de medida son a su vez las mismas leyes que gobiernan a la o las teorías que intentan verificarse, a pesar del hecho de que los aparatos de medida son también “objetos de experiencia”. Sin embargo, para el caso de la física moderna, el papel de los instrumentos de medida resulta relevante, sobre todo desde el punto de vista metodológico.

<sup>13</sup> El círculo kantiano de auto-consistencia sólo es un esquema para ilustrar los elementos implícitos en la constitución de objetos de experiencia, y tal que configuran lo que he llamado “ontología de la experiencia”; la conexión deductiva (como inferencia) obedece a un carácter metodológico, y tal que los elementos se retroalimentan en la constitución de objetos de experiencia.

<sup>14</sup> *Cfr.* “Una teoría física será llamada *determinista* cuando, partiendo del conocimiento supuesto de los resultados de ciertas mediciones iniciales, sea posible prever con certeza el resultado de cualquier medición ulterior” (Février, 1957: 22). Para un análisis sustancial sobre la causalidad y el determinismo puede verse el texto de Rudolf Carnap (1969): *Fundamentación lógica de la física*.

<sup>15</sup> Cabe aclarar aquí el sentido en que hemos interpretado a Kant, con respecto a las dos primeras analogías de la experiencia, donde, por ejemplo, la ley de la causalidad como principio regulativo

- Condiciones formales (formas puras de la sensibilidad y entendimiento).
- Condiciones materiales (instrumentos de medida).
- Marcos epistémicos (*frameworks*), lo que sería el contenido de una teoría, que contempla ecuaciones, objetos como puntos, masas, etc., así como la naturaleza de los objetos en una geometría euclidiana tridimensional, entre otros.

Con respecto al último punto, por ejemplo, éste está relacionado con ciertos aspectos propios que Kant postula en el prefacio de *MAN*, en relación con la ciencia de la naturaleza, esto es:

“La ciencia de la naturaleza, por su parte, será llamada *propia* o *impropiamente* ciencia de la naturaleza; la primera tratará a su objeto exclusivamente de acuerdo con principios *a priori*; la segunda lo hará de acuerdo con las leyes de la experiencia” (IV, 468). Y aunado a esto: “Afirmo, pues, que en toda teoría particular de la naturaleza no podrá encontrarse ciencia *en sentido propio*, más que en la medida en que pueda encontrarse *matemática* en ella” (IV, 470).

En relación con el primer punto, la física newtoniana, a la sazón de Kant, tiene como principios *a priori* a las tres leyes de Newton que son, al mismo tiempo, las que “ejemplifican” las categorías de substancia, causalidad y comunidad (analogías de la experiencia) y ha de complementarse, impropriamente, con el establecimiento de leyes empíricas, formando lo que Kant llama un “conocimiento racional aplicado”. Pero finalmente, la legitimidad de una ciencia de la naturaleza, para Kant, está sustentada solamente en la medida de que posea principios *a priori*, que dependen directamente de la teoría física, los cuales corresponden a las tres leyes de Newton<sup>16</sup>. Con respecto al segundo punto, debe haber matemática en toda ciencia de la naturaleza, es decir, debe estructurarse un marco epistémico (*framework*), definido por un conjunto de principios, ecuaciones y objetos, lo cual se ve materializado en los modelos matemáticos que dicha teoría establezca, y con los cuales, se llevan a cabo predicciones, a la vez de postular objetos.

Por tanto, la física newtoniana es una ciencia de la naturaleza, en sentido kantiano, puesto que resulta ser una investigación sobre principios *a priori* de la naturaleza, la cual constituye objetos de experiencia en atención a dichos principios, y en atención a condiciones materiales y marcos epistémicos, los cuales conforman condiciones de objetividad, que metodológicamente definen un “círculo kantiano de auto-consistencia”. Con todo esto: la manera en que en la física newtoniana se constituyen los objetos de experiencia define una “ontología de la experiencia”.

---

*a priori* no está referido a lo que se entiende como «causalidad absoluta» (una misma causa-un mismo efecto).

<sup>16</sup> La ley de la gravitación universal, está relacionada con las analogías de la experiencia. Cada una de las analogías, como principios *a priori*, fundamenta dicha ley.

## La constitución de objetos de experiencia en relatividad general

Para el caso de la relatividad, puede ser posible establecer un “círculo kantiano de auto-consistencia”, aunque bajo ciertas restricciones; sin embargo, el hecho de que la relatividad sea una teoría determinista, la acerca más al círculo kantiano de la física newtoniana, sólo que el carácter no euclidiano del espacio-tiempo relativista puede representar un inconveniente, claro, siempre y cuando no se considere el hecho de que espacio y tiempo forman parte de la misma “ontología de la experiencia”, propia de una teoría. Lo que habré de mostrar es que precisamente puede establecerse un “círculo kantiano de auto-consistencia” en la relatividad general, en términos de los test clásicos de dicha teoría, lo que por ende mostraría que la relatividad general está en concordancia con lo que he llamado una “ontología de la experiencia”, además de que fundamentaré la cuestión: ¿qué son el espacio y el tiempo como objetos de experiencia?

Dado que la teoría de la relatividad es considerada la mejor teoría sobre el espacio-tiempo, y sus predicciones han sido probadas con precisión, ésta constituye, en su versión general, la base de la cosmología moderna. Así pues, en consideración al marco epistémico (*framework*) de la relatividad general, toda teoría del espacio-tiempo puede caracterizarse en términos de modelos de espacio-tiempo (Earman and Norton, 1987), esto es, un modelo como variedad cuatridimensional diferenciable  $M$ , junto con un conjunto de objetos geométricos definidos en cada punto de la variedad, de manera que pueden establecerse un conjunto de  $n+1$  elementos de la forma:  $\langle M, O_1, \dots, O_n \rangle$ , donde  $M$  es una variedad diferenciable con una estructura intrínseca<sup>17</sup>, y  $O_1, \dots, O_n$  son objetos geométricos para los cuales, en un modelo específico, se satisfacen un conjunto de ecuaciones de campo<sup>18</sup>, que para fines prácticos pueden especificarse en la siguiente forma:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = (8\pi k/c^4)T_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$ : Tensor de Ricci  
 $g_{\mu\nu}$ : Tensor métrico ( $ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$ )  
 $T_{\mu\nu}$ : Tensor energía impulso  
 $k$ : Constante gravitatoria  
 $R$ : Curvatura escalar  
 $c$ : Velocidad de la luz  
 $\mu, \nu = 1, \dots, 4$ .

<sup>17</sup> Entre otros aspectos, en  $M$  existe un difeomorfismo  $d: M \rightarrow M$ , es decir, un mapeo de  $M$  sobre sí misma, tal que el modelo de espacio-tiempo satisface una covariancia sustantiva para una métrica específica.

<sup>18</sup> Existe otra versión de las ecuaciones de campo que involucran lo que se conoce como “constante cosmológica”; sin embargo, independientemente de que si se considera dicha versión de las ecuaciones de campo, las predicciones observables pueden cambiar, lo que no afecta a la condición de objetividad (a la manera en que se llega a constituir un objeto) al tomar como marco teórico dicha versión de las ecuaciones de campo.

Donde cada objeto en las ecuaciones de campo ha de ser un tensor<sup>19</sup>. Lo anterior llega a constituir, grosso modo, el marco teórico de la relatividad general y, en el tenor del “círculo kantiano de auto-consistencia” visto en el anterior apartado, éste forma parte de los criterios de objetividad para constituir objetos de experiencia, pues constituye el marco epistémico (*framework*) de la teoría. Cabe señalar que esta teoría establece una interrelación entre la estructura geométrica del espacio-tiempo y la distribución de la materia. En un sentido, puede decirse que: “*El espacio actúa sobre la materia diciéndole cómo moverse y, del mismo modo, la materia actúa de regreso sobre el espacio, diciéndole cómo curvarse.*” (Misner et. al, 1973: 5); en otras palabras, la estructura del espacio-tiempo tiene una “condición dinámica”, esto es, que la distribución de materia influye sobre la estructura del espacio-tiempo y viceversa<sup>20</sup>.

Finalmente, es preciso mencionar que una solución al conjunto de ecuaciones de campo permite estructurar predicciones observables<sup>21</sup>.

Así, en relatividad general el espacio euclidiano es sustituido por el espacio-tiempo cuatridimensional, perdiendo éste tanto cierta condición sustancial como la fuerza gravitacional de acción a distancia a la Newton deja de tener importancia para explicar la gravedad, lo cual podría presentar ciertos inconvenientes epistemológicos, con respecto a la posibilidad de establecer el “círculo kantiano de auto-consistencia”. Aunque si bien, a primera vista, por ejemplo, el carácter sintético *a priori* y subjetivo del espacio postulado por Kant, está vinculado sólo con la geometría euclidiana, y la identificación literal de su teoría de la constitución de objetos de experiencia con la ontología de la física newtoniana, puede convencernos que no es válida la teoría kantiana de la constitución de objetos de experiencia en el marco de la relatividad gene-

---

<sup>19</sup> Un tensor es un objeto matemático que posee componentes; para el caso de la relatividad, los tensores poseen cuatro componentes.

<sup>20</sup> Tim Maudlin hace una aclaración puntual con respecto a la relatividad general: “Es cierto que la relatividad general la materia *influye* en la geometría del espacio-tiempo, pero la distribución de la materia no *determina* la geometría del espacio-tiempo” (Maudlin, 2014: 199). Debido a la forma de las ecuaciones de campo, existen muchas soluciones de éstas en donde no se considera la existencia de materia; en particular, una de estas soluciones corresponde al espacio-tiempo de Minkowski.

<sup>21</sup> En cierta forma, definir lo que es un “observable” en relatividad general no está exento de ciertas controversias. “¿Qué es un observable en relatividad general? Carlo Rovelli (2000) nos da los siguientes ejemplos: ‘la distancia entre la Tierra y Venus durante el último eclipse solar’; ‘el número de pulsos de un pulsar en un sistema binario que alcanza la Tierra durante una revolución del sistema’; y, “la energía depositada sobre una antena gravitacional por una onda gravitacional” (Rickles, 2008: 138).

<sup>21</sup> Como vimos en el apartado anterior, en un cierto sentido, Kant entiende por espacio material o relativo, al espacio físico, y por tanto, el espacio euclidiano sólo es una representación estructurada de dicho espacio, a la vez de que el “espacio absoluto” a la Newton sólo constituye una “idea

ral; lo anterior no es concluyente<sup>22</sup>, puesto que el simple hecho de que pueda configurarse la experiencia de un “objeto” de la realidad, que fácilmente se distingue del observador, contiene un cierto matiz kantiano, y la relatividad general no está exenta de ello. En este último sentido: toda verificación experimental de la relatividad nos dice algo sobre las propiedades y estructura del espacio-tiempo, y cada test de la relatividad es constituido en un círculo auto-consistente que apela a condiciones de objetividad, y donde tales condiciones están conformadas por principios formales *a priori*, principios materiales (leyes en que están basados los aparatos de medida), y marcos epistémicos (modelos y teorías), lo que hemos llamado una “ontología de la experiencia”.

En todo esto se ha dejado de lado el hecho de que en la mecánica newtoniana los objetos y sus propiedades poseen una interdependencia y aquéllos a su vez una permanencia; esto permite identificar fácilmente los estados observables de los no observables y éstos, a la par de las ecuaciones y propiedades de los objetos, sus estados, y las leyes, son invariantes bajo transformaciones, así como para las mediciones de los aparatos, manteniéndose inalterables los requerimientos de objetividad. El caso es un tanto distinto para la relatividad general, donde a pesar de que el postulado de covariancia de las leyes y las condiciones de simetría bajo transformaciones (entre otras condiciones, como el que es una teoría determinista) pueden llevarnos a aceptar de entrada el círculo kantiano, el carácter dinámico de la estructura del espacio-tiempo le presenta un cierto dilema a la condición del observador en relatividad general<sup>23</sup>, entre otros aspectos. Lo que nos interesa aquí son los aspectos experimentales de la relatividad general, lo que a su vez está vinculado con la manera en que se constituyen objetos.

---

de la razón”, por lo que en una “ontología de la experiencia”, el espacio y el tiempo, en su sentido físico, obedecen al marco epistémico propio de una teoría; no necesariamente están vinculados, literalmente, con el carácter ideal, subjetivo, postulado por Kant.

<sup>22</sup> Como vimos en el apartado anterior, en un cierto sentido, Kant entiende por espacio material o relativo, al espacio físico, y por tanto, el espacio euclidiano sólo es una representación estructurada de dicho espacio, a la vez de que el “espacio absoluto” a la Newton sólo constituye una “idea de la razón”, por lo que en una “ontología de la experiencia”, el espacio y el tiempo, en su sentido físico, obedecen al marco epistémico propio de una teoría; no necesariamente están vinculados, literalmente, con el carácter ideal, subjetivo, postulado por Kant.

<sup>23</sup> En términos generales, la física clásica es entendida como una ciencia que fácilmente distingue al observador de la realidad física, de manera que resulta irrelevante considerar el papel de los instrumentos y los procesos de medida; caso distinto para la física moderna, en especial la mecánica cuántica, donde podría decirse que el papel del observador resulta relevante para los resultados experimentales, así como para la relatividad, pues debe considerarse, de una u otra forma, el papel del observador como algo fundamental en los procesos de medición. En este sentido, muchos autores han mostrado que puede seguirse identificando aspectos trascendentales en la mecánica cuántica, de entrada por lo que ha significado “la interpretación de Copenhagen”. Ver Hacyan (2006), Mittelstaedt (1994, 2009), entre otros.

Ahora bien, centrémonos en la pregunta: ¿qué son el espacio y el tiempo en la experiencia? La cual llega a tener sentido en el marco de la relatividad general, pues precisamente en esta teoría se verifica experimentalmente la estructura del espacio-tiempo en términos de la distribución de la materia, pues lo que cada test de la relatividad está midiendo son cantidades invariantes<sup>24</sup>. Así, con respecto al espacio, decir “probar el espacio” implica verificar experimentalmente la naturaleza del espacio físico, esto es, poder responder a la cuestión de si el espacio físico tiene una estructura euclidiana o no euclidiana, lo que nos remonta al experimento tratado por Gauss de testar si el espacio físico es euclidiano, caso identificado por Poincaré (1905/1952), quien afirmó que tratar de resolver el problema de cuál es la geometría verdadera carece de sentido, pues sólo es un asunto de convención. Si bien, en la *Estética Trascendental*, Kant estableció el carácter ontológico del espacio y el tiempo<sup>25</sup> en términos de formas puras a priori de la sensibilidad, cabe destacar que en una nota de la *Deducción Trascendental*, Kant afirma una condición del espacio que permite identificarlo como objeto:

El espacio, representado como objeto, (como efectivamente se lo requiere en la geometría), contiene más que una mera forma de la intuición, a saber, [contiene] *conjunción*, en una representación *intuitiva*, de lo múltiple dado según la forma de la sensibilidad; de manera que la *forma de la intuición* suministra un mero múltiple, pero la *intuición formal* [suministra] unidad de la representación. Esta unidad la conté, en la “Estética”, como perteneciente meramente a la sensibilidad, sólo para hacer notar que ella precede a todo concepto, a pesar de que presupone una síntesis que no pertenece a los sentidos, por la cual, empero, llegan a ser, ante todo, posibles todos los conceptos de espacio y tiempo (KrV, B161 n).

Por tanto, tomar al espacio, por ejemplo, como objeto de experiencia, ha de presuponer una síntesis representada en todo concepto empírico de espacio (aplicación de cualquier geometría al análisis del mundo físico), y en lo que implica constituirlo como objeto de una posible experiencia, a la vez que debe suponerse al espacio como dado *a priori*, es decir, que el espacio es un *objeto* de la realidad, sin que por ello implique que se le está reificando. Dicho lo anterior: la relatividad es la teoría que más conocimiento arroja sobre las propiedades y estructura del espacio y el tiempo, en términos de la entidad llamada espacio-tiempo. Así, podemos plantear la cuestión: ¿qué son el espacio y el tiempo en la experiencia? y asimismo: ¿cuál es su naturaleza en la experiencia? Aunque primeramente debemos responder a otra cuestión: ¿cómo es constituido un objeto de experiencia en relatividad general?

---

<sup>24</sup> Alguna cantidad invariante (observable) es por ejemplo la curvatura.

<sup>25</sup> De nuevo habrá que recordar la distinción entre espacio y tiempo como formas puras a priori de la sensibilidad (las cuales, tomadas así, carecen de estructura), y espacio y tiempo como entidades físicas, las cuales adquieren una estructura, el representarlos por medio de una estructura matemática.

Así, se sabe que kantianamente habría de entrada que decir que nuestra intuición espacial es euclidiana, y los objetos que percibimos y constituimos en la experiencia poseen un carácter euclidiano, aunque la epistemología de Kant no termina ahí. Curiosamente, el espacio físico, en la experiencia y después incluso de la relatividad, puede considerarse tanto euclidiano como no euclidiano<sup>26</sup>, pues la física newtoniana se considera un caso límite de la relatividad; y no es que sea una teoría falsa sino más bien restringida, ya que si puede afirmarse que con la relatividad general el espacio físico tiene una estructura no euclidiana, es de por sí conocido que toda proposición de cualquier geometría, en cuanto a la existencia de objetos, constituye una proposición empíricamente contingente y, además, el que sea posible llevar a cabo experiencias en el marco de la relatividad general, a pesar de que postule una estructura espacial no euclidiana, coloca a la relatividad más cerca de Kant de lo que muchos intérpretes han creído<sup>27</sup>. Entonces, ¿qué es el espacio, y a su vez, qué es el tiempo, en la experiencia? Esta pregunta sólo puede ser contestada en relación necesariamente con los test de la relatividad general.

Dado que aquí lo que nos interesa son los aspectos observacionales y experimentales de la relatividad general; es preciso mencionar que una solución al conjunto de ecuaciones de campo del modelo permite estructurar predicciones observables. Así, las primeras predicciones anunciadas por Einstein, como los test a la relatividad general, y ampliamente corroboradas (Will, 1993) corresponden a:

- La curvatura de la trayectoria de la luz al pasar cerca de un cuerpo masivo (curvatura del espacio-tiempo).
- El corrimiento gravitacional de la luz hacia el rojo.
- El avance del perihelio de Mercurio<sup>28</sup>.

Como se mencionó anteriormente: una solución al conjunto de ecuaciones de campo permite establecer condiciones observables, y con respecto a los test clásicos de la relatividad general, el tratamiento teórico para la curvatura de la trayectoria de la luz al pasar cerca de un cuerpo masivo, implica partir

---

<sup>26</sup> Esta afirmación sólo tiene sentido en atención a que la física de Newton se considera un caso límite de la relatividad, por lo que pueden llevarse a cabo experiencias tanto en el marco espaciotemporal de dicha física, como en el de la relatividad. Además, ambas teorías, con su muy particular estructura espacio-temporal, poseen suficiente “poder explicativo y experimental”; de aquí el por qué no aceptamos la idea, por ejemplo, de que la física newtoniana sea una «teoría falsa», más bien es restringida.

<sup>27</sup> En un cierto sentido, autores como John Norton (1987) consideran que con la relatividad general “se pierde el último vestigio de objetividad sobre el espacio y el tiempo”, el mismo Einstein lo señaló en 1916.

<sup>28</sup> Para detalles específicos sobre este test de la relatividad general, puede consultarse Lawden (1982); Will (1993, 2005); entre otros.

de la condición de que para dos eventos en un espacio-tiempo tipo tiempo, la cantidad

$$dT^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu},$$

permanece invariante, es decir, tiene el mismo valor para todos los observadores. De aquí que para la transmisión de un rayo de luz y su recepción en un punto distante se tiene  $dT^2=0$ , considerando a su vez que el intervalo entre dos eventos es:  $ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$ , y finalmente, tomando la métrica de Schwarzschild<sup>29</sup>, y haciendo ciertas aproximaciones, se obtiene el valor del ángulo de deflexión del rayo de luz de una estrella distante al pasar cerca del sol:  $8.62 \times 10^{-6}$  radianes, o  $1.77''$ <sup>30</sup>. Cabe señalar que:

En noviembre de 1915 Einstein duplicó la predicción. Para ese tiempo ya había completado la teoría general de la relatividad, y había descubierto que, en una primera aproximación a las ecuaciones de la teoría, la desviación debía ser de 1.75 segundos de arco, y no de 0.875 segundos (Will, 2005: 63).

Esta última predicción precisamente le sirvió de referencia a Eddington en 1919<sup>31</sup> para llevar a cabo su famoso test, obteniendo resultados con un mínimo de error (ver Will, 2005)<sup>32</sup>; pero mediante un experimento cuyas características podría decirse que son clásicas, pues estaba basado en técnicas ópticas de observación, y donde dicho test puede considerarse que cumple con el “círculo kantiano de auto-consistencia” visto en la sección anterior. ¿Qué nos dice esto? Un test clásico muestra la validez de una teoría de la física moderna, a pesar de que como menciona Mittelstaedt:

---

<sup>29</sup> Karl Schwarzschild fue un matemático y astrónomo alemán, obtuvo la primera solución exacta de las ecuaciones de campo de Einstein en 1916; su métrica es de las más recurrentes, dado que considera un espacio-tiempo generado por una distribución de materia de simetría esférica, con un campo gravitacional de la misma forma, lo cual precisamente corresponde a las condiciones del campo gravitacional del Sol, al cual estará sometido un rayo de luz que proviene de una estrella lejana. Para la expresión matemática de dicha métrica, puede verse *Relatividad para estudiantes de física*, de Shahen Hacyan (2013).

<sup>30</sup> Las especificaciones técnicas de este cálculo pueden consultarse en *Introduction to Tensor Calculus, Relativity and Cosmology*, de D. F. Lawden (1982) o en el ya clásico *Exploring Black Holes*. *Introduction to General Relativity*, de Edwin F. Taylor and John Archibald Wheeler [Addison Wesley Longman, USA, 2000].

<sup>31</sup> El test se llevó a cabo el 8 de marzo de 1919, en las costas de la Guinea española, durante un eclipse total de Sol. El experimento consiste en tomar fotografías, por medio de un telescopio, del Sol en el momento del eclipse, y compararlas con otras del campo estelar cuando éste no se encuentra, lo cual constituye un experimento con características clásicas.

<sup>32</sup> Existen varios otros test con características similares, de los cuales el más reciente se llevó a cabo en 1973, organizado por las universidades de Texas y Princeton, y tuvo lugar en el oasis Chinguetti en Mauritania. (Ver Will, 2005).



En la física moderna (relatividad, teoría cuántica, cosmología) los juicios sintéticos *a priori* de Kant (conservación de la sustancia, causalidad e individualidad) pierden su validez general.<sup>33</sup> La razón de esta violación está íntimamente conectada con la observación de Einstein tal que en la física moderna las precondiciones materiales de la experiencia, i. e. las leyes físicas de los aparatos de medida, ya no son constituyentes independientes del proceso de cognición, pero se siguen de las leyes físicas del dominio de la realidad considerada. Estas nuevas y modificadas precondiciones de la experiencia proveen algunas serias dificultades para la constitución de objetos (Mittelstaedt, 1994: 115-6).

Con lo anterior, cabe señalar que en la física moderna, se deben establecer de entrada las condiciones específicas de objetividad, en atención a que pueda identificarse el papel de los instrumentos de medida en el proceso de cognición de un experimento, es decir, debe especificarse el papel preciso del “observador” en todo experimento.<sup>34</sup> Sólo hay que señalar que tanto en física newtoniana como en física moderna, las posibilidades materiales de la experiencia (instrumentos de medida), tanto extienden como especifican las posibilidades para constituir objetos. En física newtoniana hay un carácter de auto-referencia con respecto a los aparatos de medida: las leyes de los aparatos son a su vez las mismas leyes que gobiernan a la teoría que se está testando, con lo que el “círculo kantiano de auto-consistencia” resulta evidente. En el caso de las teorías de la física moderna, todo depende del “ámbito de realidad” que se desee testar, lo cual implica que los principios (analogías de la experiencia) mediante los cuales se constituyen objetos, según Kant, resultan ser válidos sólo en ciertos dominios.

Ahora bien, la prueba sobre el corrimiento gravitacional hacia el rojo llegaría a ser concluyente hasta la década de los 60's del siglo pasado, e implicó la utilización de técnicas experimentales de alta precisión basadas en la mecánica cuántica, así como superconductores, láseres, etc. Además, muchas otras consecuencias de la relatividad general, tales como la existencia de los agujeros negros, han sido ampliamente corroboradas con técnicas que van desde la radioastronomía al uso de los relojes atómicos. De todo esto: ¿qué es lo que se está probando con éstos y otros experimentos?, ¿sólo la veracidad de la relatividad general?, ¿partes de la estructura y propiedades del espacio-tiempo postuladas por dicha teoría? A primera vista, el carácter sintético *a priori* del espacio kantiano, vinculado sólo con la geometría euclidiana, y la identificación literal de su teoría de la constitución de objetos de experiencia con la ontología de la

---

<sup>33</sup> Dicha validez está restringida a regiones espaciotemporales donde se pueden establecer relaciones causales entre eventos.

<sup>34</sup> Para detalles precisos sobre éste y otros aspectos experimentales en ciencia, puede verse *Measurement, Realism and Objectivity. Essays on Measurement in the social and Physical Sciences*, Forge, John (ed.). (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1987).

física newtoniana<sup>35</sup>, puede convencernos de que la relatividad general incluso nos da acceso a otro “nivel fenoménico” y, por tanto, no es válida la teoría kantiana de la constitución de objetos de experiencia en el marco de la relatividad general<sup>36</sup>. Cabe señalar que el simple hecho de que pueda configurarse la experiencia de un “objeto” de la realidad, que fácilmente se distingue del observador, contiene un cierto matiz kantiano, y la relatividad general no está exenta de ello. Por tanto, como se mencionó anteriormente: toda verificación experimental de la relatividad nos dice algo sobre las propiedades y estructura del espacio-tiempo, esto es, nos dice lo que es el espacio y lo que es el tiempo en la experiencia, y cómo si son tomados como “objetos de experiencia” éstos son constituidos en un círculo auto-consistente que apela a condiciones de objetividad. Tales condiciones, como se vio en la sección pasada para el caso de la física de Newton, están conformadas por principios formales *a priori* (intuiciones y categorías), principios materiales (leyes en que están basados los aparatos de medida), y marcos epistémicos (modelos y teorías).

Resulta importante señalar que en la física newtoniana los objetos y sus propiedades poseen una interdependencia y aquéllos a su vez una permanencia, lo que permite identificar fácilmente los estados observables de los no observables y, éstos, como las ecuaciones y las propiedades de los objetos, así como sus estados a la vez de las leyes, son invariantes bajo transformaciones<sup>37</sup>; asimismo para las mediciones de los aparatos, manteniéndose inalterables los requerimientos de objetividad. Como ya se mencionó en párrafos anteriores: el caso es un tanto distinto para la relatividad general, donde a pesar de que el postulado de covariancia de las leyes y las condiciones de simetría bajo transformaciones (entre otras condiciones, como el que es una teoría determinista) pueden llevarnos a aceptar de entrada el círculo kantiano, el carácter dinámico de la estructura del espacio-tiempo le presenta un cierto dilema a

---

<sup>35</sup> En términos generales, la ontología de la mecánica clásica puede caracterizarse por algunos puntos fundamentales:

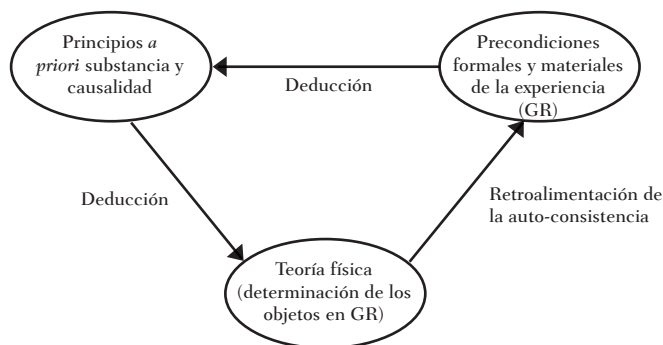
- Se supone una teoría física fundamental (mecánica newtoniana), la cual se concibe en acuerdo con el mundo físico en un espacio tridimensional.
- Las entidades que postula la teoría son partículas, cuya historia está acorde a la teoría.
- La teoría contiene tanto variables primitivas como no primitivas.

Lo cual conforma lo que se ha denominado un *framework*, ver por ejemplo Allori (2013).

<sup>36</sup> Como ya hemos mencionado, la validez del marco epistemológico kantiano en la teoría de la relatividad, está restringida a regiones espaciotemporales de tipo temporal, es decir, donde pueden identificarse relaciones causales entre eventos.

<sup>37</sup> Las transformaciones galileanas. Para un sistema de referencia S con coordenadas  $x, y, z, t$ , en reposo, y un sistema de referencia S' moviéndose en la dirección  $x$  con coordenadas  $x', y', z', t'$ , con componentes de la velocidad  $v_x, v_y, v_z$ , y si S y S' coinciden en  $t=0$ , entonces, para  $v_y=v_z=0$ , las transformaciones de Galileo quedan:  $x'=x-v_x t$ ,  $y'=y$ ,  $z'=z$  y  $t'=t$ .

la condición del observador en relatividad general<sup>38</sup>, entre otros aspectos. Aun así es factible decir que el “círculo kantiano de auto-consistencia” para la relatividad general puede ser formulado tomando en cuenta que las condiciones materiales, aparatos de medida, pueden estar basados tanto en leyes clásicas como en leyes de la mecánica cuántica, y que las categorías de substancia y causalidad adquieren otro matiz, dependiendo del tipo de fenómeno que se desea experimentar y de las características de los aparatos de medida, pues éstos pueden estar basados en leyes clásicas o cuánticas; por lo que hablaremos de GR-sustancia y GR-causalidad, ya que existe una interdependencia entre las leyes en que están basados los aparatos de medida, y lo que ha de referirse a dichas categorías, es decir, si un aparato está basado en leyes clásicas, substancia y causalidad son entendidas en términos clásicos, si está basado en leyes cuánticas, sustancia y causalidad adquieren otro matiz<sup>39</sup>; aún con esto, dicho círculo modificado será:



<sup>38</sup> La relatividad general está sustentada en dos postulados fundamentales (ver Hacyan 2013):

- 1) El espacio-tiempo físico constituye una variedad riemanniana de 4 dimensiones, donde se define una métrica  $ds^2 = g^{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta$  ( $\alpha, \beta = 0, 1, 2, 3$ ), con curvatura debida al campo gravitacional. Además, cada punto de dicho espacio-tiempo admite un espacio-tiempo (Minkowski) tangente, el cual es precisamente el espacio-tiempo en ausencia de campos gravitacionales, y a su vez, funge como el espacio-tiempo local (marco de referencia donde se estructuran los experimentos). Una partícula en caída libre ha de moverse en una geodésica a través de dicho espacio curvo.
- 2) Las leyes de la física son covariantes frente a cualquier conjunto de transformación de coordenadas, caso especial en todo difeomorfismo.

<sup>39</sup> Si bien, este punto precisamente constituye uno de los más fundamentales por donde transitan las críticas a la teoría de constitución de objetos de tipo kantiano, cabe decir que los objetos de toda posible experiencia, en el marco de la física moderna, dependen de las características con que se estructura un experimento, y del carácter ontológico de la teoría por la que se constituye una experiencia, es decir, la teoría postula objetos, y de ahí que se diseñe un experimento, con ciertas condiciones y cierto tipo de aparatos de medición, que permiten individuar algún objeto, por lo que sigue habiendo un carácter kantiano.

Finalmente, el principal problema de la epistemología kantiana frente a la relatividad general estriba en el carácter ontológico del espacio y el tiempo; aunque, como señalamos anteriormente, en el caso del espacio, por ejemplo, una cosa es el espacio como condición subjetiva de la sensibilidad (intuición pura *a priori*), y otra el espacio como entidad física, que en su esencia tiene que ver con una estructura geométrica, la cual, en el tenor de Kant, está relacionada con principios constitutivos de objetos de experiencia, principios matemáticos, y dicha estructura corresponde al espacio euclidiano, mas no hay que entenderlo en su sentido de naturaleza del espacio físico.

Como ya ha mostrado Reichenbach<sup>40</sup> (1920/1965), pueden identificarse dos sentidos del *a priori* en Kant: uno, válido y universal; y otro, constitutivo del objeto de experiencia. Lo que hemos hecho es señalar que para constituir objetos, ya sea en un marco o en otro, se establecen de principio las condiciones de objetividad, las que apelan a condiciones propias del “sujeto cognitivo”<sup>41</sup> (intuiciones y categorías), marcos epistémicos (*frameworks*) y condiciones materiales (aparatos de medida), que constituyen a su vez lo que hemos llamado una “ontología de la experiencia”, donde los objetos de experiencia, metodológicamente, apelan a un “círculo kantiano de auto-consistencia” y, a la vez, el marco espacio-temporal forma parte de la “ontología de la experiencia” pues es parte del marco epistémico de una teoría. Por tanto, sólo hay que señalar que en la ciencia, y en especial en la física, los criterios de objetividad tienen que ver con que para constituir objetos:

Toda teoría científica incorpora una serie de principios que constituyen condiciones de posibilidad de sus objetos de experiencia, es decir, cierto sistema conceptual básico que define un campo de posibilidades empíricas particulares; y en segundo lugar, que dichos principios conceptuales operan constitutivamente en la experiencia determinando *a priori* el ámbito del conocimiento empírico (Peláez-Cedrés, 2008: 126).

Como bien menciona Michael Friedman para el caso de la física newtoniana:

La versión original de Kant de la filosofía trascendental toma a la geometría euclidiana y a las leyes de movimiento de Newton como principios constitutivos sintéticos *a priori* —los cuales, desde el punto de vista de Kant, funcionan como presuposiciones necesarias para aplicar nuestros conceptos fundamentales de espacio, tiempo, materia y movimiento a nuestra experiencia sensible del mundo material (Friedman, 2009: 253).

---

<sup>40</sup> Asimismo, Reichenbach estaba convencido de que: 1) toda teoría científica incorpora principios, que fungan como posibilidades para constituir objetos; y 2) que dichos principios operan en la experiencia, determinando *a priori* el ámbito del conocimiento empírico. Con esto, resulta relevante resaltar el sentido que el autor le da al carácter constitutivo de principios *a priori*, de la experiencia, en el sentido de Kant.

<sup>41</sup> Específicamente nos estamos refiriendo a la condición del “observador”.

La variedad espacio-tiempo cuatridimensional, por ejemplo, es un elemento *a priori* en el marco de la relatividad general, análogo al espacio euclidiano tridimensional para el marco newtoniano.

Ahora bien, en atención a lo anterior, y haciendo una analogía para el caso de la relatividad general, ¿cuáles serían sus principios constitutivos sintéticos *a priori*? Si aceptamos la tesis de lo “*a priori* constitutivo del objeto de experiencia” tendríamos los siguientes:

- El principio de la constancia de la velocidad de la luz.
- El postulado de covariancia de las leyes.
- El espacio-tiempo físico es un espacio de Riemann de 4 dimensiones.

Los dos primeros principios son experimentales, sintéticos, pero sólo *a priori* en el sentido de necesarios para la constitución de objetos. La postulación de un espacio-tiempo curvo, como ya se mencionó, es análoga a la postulación de un espacio euclidiano<sup>42</sup>, pues sólo constituyen el marco espacio-temporal en el que se llevan a cabo los fenómenos que ha de estudiar determinada teoría. Los marcos epistémicos de teorías como la física newtoniana y la relatividad general poseen características generales que son similares: ambos postulan objetos (partículas, masas, campos, objetos geométricos...); sus observables están vinculados a un conjunto formal de ecuaciones matemáticas; los objetos que ambas teorías postulan se analizan en marcos espacio-temporales; en las mediciones experimentales, el papel del observador depende directamente de las condiciones de objetividad que de entrada se establezcan para llevar a cabo el experimento. Por tanto: en ambas teorías se pueden establecer juicios sintéticos *a priori*.<sup>43</sup> Finalmente, los principios formales (categorías) mediante los cuales se constituyen objetos a la sazón de Kant: permanencia de la substancia<sup>44</sup>, causalidad<sup>45</sup> y comunidad, al ser en cierta medida regulativos en el marco de una teoría de la física, guían la experiencia y permiten llevar a cabo una síntesis, pero no puede dejarse a un lado su carácter constitutivo, pues son principios *a priori* que forman parte del marco epistémico de una teoría, dígase por ejemplo la física newtoniana.

---

<sup>42</sup> Michael Friedman (1983) mostró que la mecánica clásica también puede fundamentarse en un espacio-tiempo cuatridimensional, de carácter euclidiano.

<sup>43</sup> A este tenor, Juan Cano de Pablo, en su (2004), ha mostrado cómo puede identificarse un “*a priori* en la teoría de la relatividad”.

<sup>44</sup> En Kant, a diferencia de algunos intérpretes, hablar de «permanencia de la substancia», implica, en primera instancia, entender que lo permanente sólo es el “substrato de la substancia en el tiempo”.

<sup>45</sup> Henry Allison (1983/1992) ha mostrado que el principio de causalidad sólo es un principio que afirma «todo-evento-alguna-causa» por lo que, en este sentido, dicho principio adquiere una mejor aplicación al caso de la relatividad, y puede también que al caso de la mecánica cuántica.

Hemos visto que la constitución de un objeto de experiencia, en el marco de la relatividad general, obedece también a principios invariantes, *a priori*, sintéticos y formales<sup>46</sup>, y la manera en que se constituyen objetos de experiencia en el marco de dicha teoría es análogo a lo postulado por Kant para el caso de la física newtoniana.

La relatividad general posee cierto carácter trascendental porque su condición empírica sigue obediendo a una manera kantiana de constituir objetos de experiencia, de constituir los test de la relatividad general y, a su vez, existe un rango de validez de los principios *a priori* kantianos en relación con la constitución de objetos de experiencia para la relatividad general. Así, en la relatividad general, la forma de constituir objetos de experiencia puede considerarse que atiende a una “ontología de la experiencia”, que involucra condiciones cognitivas (categorías e intuiciones), marcos epistémicos (*frameworks*) y condiciones materiales, y donde la constitución de los objetos se lleva a cabo en un “círculo kantiano de auto-consistencia”, de manera similar a como es el caso para la física newtoniana, conformando asimismo una “ontología de la experiencia”.


## Conclusiones

Los conceptos de espacio y tiempo de la teoría de la relatividad ofrecen un terreno de análisis fértil tanto teórica como experimentalmente, en ciertos aspectos, la epistemología kantiana sigue estando vigente en el contexto de dicha teoría. Del mismo modo, puede considerarse que los test de la relatividad general nos dicen lo que son el espacio y el tiempo en la experiencia, pero sólo nos muestran distintas determinaciones, si es que puede hablarse de que éstas dan cuenta de su naturaleza.

La manera de constituir objetos tanto en la física de Newton como en la relatividad general se lleva a cabo, metodológicamente, mediante un “círculo kantiano de auto-consistencia” configurando a su vez una “ontología de la experiencia”: un conjunto de objetos postulados por la teoría, los cuales son constituidos en apego a elementos epistemológicos, marcos epistémicos (*frameworks*) y posibilidades materiales (instrumentos de medida).

---

<sup>46</sup> En un cierto sentido, las pretensiones de los positivistas lógicos al rechazar lo sintético *a priori*, en el sentido de Kant, propugnando por una «reivindicación» de la experiencia como conocimiento legítimo y dador de contenido, puede que no sean del todo sostenibles. Michael Friedman (1983) pudo mostrar que las pretensiones de los positivistas lógicos, en cuanto a «liberar a la ciencia de la carga de teoría» no fueron fructíferas, en parte porque en cada “cambio de paradigma”, dígame física clásica a relatividad, hay una cierta carga teórica en las condiciones de experiencia.

Kant y su epistemología tienen cierto fundamento en el marco de la relatividad general, por lo que al poder definir una “ontología de la experiencia” para la relatividad general, puede decirse que ésta posee un cierto carácter trascendental. Los aspectos teóricos y experimentales de esta teoría no hacen más que corroborarlo. 

### **Bibliografía:**

Allori, Valia 2013 “Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories” en Ney, Alyssa; Albert, David Z (eds.) *The Wave Function. Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (New York: Oxford University Press).

Cano de Pablo, Juan 2004 “Apriorismo en la teoría de la relatividad. Respondiendo a Schlick” *Logos* (Madrid: Universidad Complutense de Madrid) Vol. 37.

Carnap, Rudolf 1969 *Fundamentación lógica de la física* (Buenos Aires: Editorial Sudamericana).

Cassirer, Ernst 1923/2012 “Einstein’s Theory of Relativity Considered from the Epistemological Standpoint” en *Substance and Function* (Chicago: The Open Court Publishing Company).

Castrejón, Gilberto 2013 “La idealidad del espacio en Kant y las geometrías no euclidianas” en *FILOSOFÍA* (Venezuela: ULA) no. 24, Enero-Diciembre.

Caygill, Howard 2009 *A Kant Dictionary* (Massachusetts: Blackwell Publishing).

Duhem, Pierre 2003 *La teoría física* (Barcelona: Herder).

Earman, John. S.; Glymour, Clark N.; Stachel, John J. (et. al) 1977 *Foundations of Space-time Theories* (Minnesota: University of Minnesota Press).

Earman, John; Norton, John 1987 “What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Argument” en *The British Journal for the Philosophy of Science* (Oxford: Oxford Academic) Vol. 38, no. 4.

Earman, John 1989 *World Enough and Space-Time. Absolute versus Relational Theories of Space and Time* (Massachusetts: The MIT Press).

Einstein, Albert 2005 *Obra esencial* (Madrid: Crítica).

Février, Paulette 1957 *Determinismo e indeterminismo* (México: UNAM).

Forge, John (ed.) 1987 *Measurement, Realism and Objectivity* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company).

Friedman, Michael 1983 *Foundations of Space-Time Theories. Relativistic*

- Physics and Philosophy of Science* (Princeton: Princeton University Press).
- 1992 *Kant and the Exact Sciences* (Cambridge: Cambridge University Press).
- 1999 *Reconsidering Logical Positivism*. (Cambridge: Cambridge University Press).— 2007 “Coordination, Constitution, and Convention: The Evolution of the A Priori in Logical Empiricism” en Richardson, Alan; Uebel, Thomas (eds.) *The Cambridge Companion to Logical Empiricism* (Cambridge: Cambridge University Press).
- 2010 “Metaphysical Foundations of Natural Science” en Bird, Graham (ed.) *A Companion to Kant* (Singapore: Wiley-Blackwell).
- Guyer, Paul 1987 *Kant and the Claims of Knowledge* (Cambridge: Cambridge University Press).
- Hacyan, Shahen 2004 *Física y metafísica del espacio y el tiempo* (México: F.C.E.).
- 2006 “On the Transcendental Ideality of Space and Time in Modern Physics” en *Kant-Studien* (Germany: Walter de Gruyter) No 97, Enero.
- 2008 “Geometry as an object of experience: Kant and the missed debate between Poincaré and Einstein” en *European Journal of Physics* 30.
- 2013 *Relatividad para estudiantes de física* (México: F.C.E.).
- Hagar, Amit 2008 “Kant and non-Euclidean Geometry” en *Kant-Studien* (Germany: Walter de Gruyter) No 99, Enero.
- Hugett, Nick 1999 *Space from Zeno to Einstein* (Boston: The MIT Press).
- Kant, Immanuel 2009 *Crítica de la razón pura* (México: F.C.E.).
- 1999 *Prolegómenos a toda metafísica futura que haya de poder presentarse como ciencia* (Madrid: Ediciones Istmo).
- 1993 *Primeros Principios Metafísicos de la Ciencia de la Naturaleza* (México: UNAM-IIF’S).
- 1992 *Theoretical Philosophy 1755-1770*, D. Walford and R. Meerbote (eds.) (New York: Cambridge University Press).
- Lawden, D. F. 1982 *Introduction to Tensor Calculus. Relativity and cosmology* (New York: Dover Publications, Inc.).
- Maudlin, Tim 2014 *Filosofía de la física. I. El espacio y el tiempo* (México: F.C.E.).
- Misner, C. K. et. al 1973 *Gravitation* (USA: W. H. Freeman).



Mittelstaedt, Peter 1976 *Philosophical Problems of Modern Physics* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company).

— 1994 “The Constitution of Objects in Kant’s Philosophy and in Modern Physics” en Parrini, Paolo (ed.) *Kant and Contemporary Epistemology* (The Netherlands: Kluwer Academic Publishers).

— 2009 “The Constitution of Objects in Classical Physics and in Quantum Physics” en Bitbol, Michael; Kerszberg, Pierre; Petitot, Jean (eds.), *Constituting Objectivity Transcendental Perspectives on Modern Physics* (Paris: Springer).

Norton, John 1987 “Einstein, the Hole Argument and the Reality of space” en Forge, John (ed.) *Measurement, Realism and Objectivity. Essays on Measurement in the Social and Physical Sciences* (Dordrecht: D. Reidel Publishing Company).

Peláez-Cedrés, Álvaro 2008 *Lo a priori constitutivo: historia y prospectiva* (Barcelona: Anthropos).

Poincaré, Henri 1952 *Science and Hypothesis*, Dover Publications, New York.

— 1984 *Filosofía de la ciencia* (México: CONACYT).

Posy, Carl J. (ed.) 1992 *Kant’s Philosophy of Mathematics* (The Netherlands: Kluwer Academic Publishers).

Reichenbach, Hans 1920/1965 *The Theory of Relativity and A Priori Knowledge* (Berkeley: University of California Press).

— 1958 *The Philosophy of Space and Time* (New York: Dover).

— 1973 *La filosofía científica* (México: F.C.E.).

— 2011 *Defending Einstein*. (Cambridge: Cambridge University Press).

Rickles, Dean 2008 *Symmetry, Structure, and Spacetime* (Amsterdam: Elsevier).

Schlick, Moritz 1923 *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Oxford: Oxford University Press).

Strawson, Peter F. 1966 *The Bounds of Sense* (London: Routledge).

Taylor, Edwin F.; Wheeler, John Archibald 2000 *Exploring Black Holes. Introduction to General Relativity* (United States of America: Addison Wesley Longman).

Torretti, Roberto 1967 *Manuel Kant. Estudio sobre los fundamentos de la filosofía crítica* (Santiago: Ediciones de la Universidad de Chile).

— 2008 “Objectivity: a Kantian Perspective”, en Massimi, Michela (ed.), *Kant and Philosophy of Science Today* (Cambridge: Cambridge University Press).

Will, Clifford M. 1993 *Theory and Experiment in Gravitation* (Cambridge: Cambridge University Press).

— 2005 *¿Tenía razón Einstein?* (Barcelona: Gedisa Editorial).

*Recibido: Abril 30, 2015. Aceptado: Abril 10, 2017*