

## La teoría relativista de la Gravitación de Einstein y la nueva concepción del Universo

POR

MANUEL ALMEYDA A.

---

(Continuación)

Cabe entonces preguntar: ¿es en realidad el espacio físico de estructura estrictamente euclídea? Esta misma pregunta se la hicieron hace ya un siglo los fundadores de las geometrías abstractas y ello fué con justísima razón. Sólo la observación y estudio detenido de la propiedades del mundo externo pueden llegar a establecer si el espacio físico se amolda o nó al espacio de nuestra geometría intuitiva. Además, como el conocimiento del Universo se amplía incesantemente, no sólo en el análisis de sus elementos más diminutos, sino también en la exploración de regiones más y más alejadas de nuestro sistema solar, se debe admitir que la cuestión de la estructura del espacio físico es un problema susceptible de perfeccionamiento indefinido, paralelo al perfeccionamiento de todas las ciencias naturales.

La ciencia de Euclides está fundada en una serie de definiciones, axiomas lógicos e hipótesis más o menos plausibles, entre las que sobresale por su importancia el llamado postulado de Euclides, que dice: «si dos rectas encuentran una tercera en un plano y si hacen hacia un mismo lado de ella ángulos interiores cuya suma sea menor que dos ángulos rectos, estas dos rectas, prolongadas indefinidamente, se encontrarán del costado en que la suma de los ángulos es inferior a dos rectos».

Desde los tiempos de los primeros discípulos del geómetra griego, hasta fines del siglo XVIII fueron innumerables las tentativas hechas para demostrar el Postulado de Euclides y sólo se consiguió llegar a establecer algunas proposiciones estrechamente ligadas con él. Se demostró, por ejemplo, que admitir el Postulado era equivalente a admitir que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos, y equivalente, también, a la afirmación de que se pueden construir figuras semejantes.

El primero que supo considerar el problema de las paralelas en su verdadero aspecto fué Gauss. Para este matemático el postulado no es una verdad susceptible de demostración, sino simplemente una hipótesis que la experiencia podría muy bien desmentir y que, en todo caso, no impediría construir la geometría sobre nuevas bases en que ese Postulado fuera abiertamente contradicho. Guiado por estas ideas se afirma que efectuó medidas geodésicas de alta precisión para tratar de comprobar si efectivamente, dentro de los errores de observación, la suma de los ángulos de grandes triángulos es exactamente igual a dos rectos, pero los resultados que obtuvo no transaron la cuestión.

Gauss sólo dió a conocer sus ideas en correspondencias privadas y por esto no es hoy día recordado generalmente como el fundador de las geometrías abstractas, gloria que recae en el matemático ruso Lobatschewsky. Este sabio construyó y publicó en 1826 un sistema completo de geometría en el cual el Postulado de Euclides es negado y sustituido por el principio de que por un punto fuera de una recta y en un mismo plano con ella se pueden trazar infinitas paralelas.

Uno de los teoremas más importantes de la geometría de Lobatschewsky es el que dice que la suma de los ángulos de un triángulo es siempre menor que dos rectos y tanto menor cuanto mayor sea el triángulo. Lobatschewsky pensó también en investigar si su Geometría se amoldaba mejor al espacio físico que la de Euclides y estudió con este fin las paralajes de las estrellas para ver si eran todas superiores a un ángulo límite, en cuyo caso habría demostrado la realidad objetiva de su sistema geométrico; pero los resultados que obtuvo fueron igualmente negativos.

Estos resultados negativos no quieren decir que el espacio físico sea efectivamente euclideo; sólo indican que, dentro de los límites actuales de apreciación, las cualidades métricas del mundo externo no permiten dilucidar si la geometría euclídea se amolde mejor o nó, que otra geometría, a la realidad. Y nótese que podrá un día llegarse a demostrar que las cualidades métricas de nuestro espacio físico se amoldan a una geometría no euclídea, pero no podrá demostrarse estrictamente jamás que es la geometría de Euclides la que en realidad le conviene, porque esto equivaldría a demostrar experimentalmente con una aproximación infinita que la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos rectos.

Pero la geometría abstracta moderna en toda su imponente y profunda generalidad, sólo ha venido a tener su origen en la memoria titulada «Über die Hypothesen die der Geometrie zu Grunde liegen», escrita en 1857 por el joven y genial matemático alemán Riemann, el discípulo predilecto de Gauss, con motivo de hacerse cargo de una cátedra de la Universidad de Gothingen. Para Riemann el concepto de espacio no es sino un caso especial del concepto matemático mucho más vasto de *multiplicidad*. Estas pueden ser continuas y discontinuas y Riemann comienza

por definir lo que se entiende por dimensión de una multiplicidad. En seguida establece que la multiplicidad continua puede ser susceptible de medida por medio de la superposición de una magnitud independiente de su posición en la multiplicidad, magnitud que sirve de término de comparación, y depende de las formas posibles como esa magnitud pueda ser trasladada de un punto a otro, que la multiplicidad tenga un número determinado de dimensiones. Tomemos dos puntos infinitamente próximos de la multiplicidad y sea  $ds$  el elemento unidimensional definido por ellos, elemento que llamaré en adelante *intervalo* entre los puntos dados. Riemann demuestra que, si el intervalo puede ser expresado como la raíz cuadrada de una forma cuadrática de las diferencias infinitamente pequeñas de las coordenadas de los puntos, la multiplicidad así definida tiene el carácter de un espacio, en su más amplia acepción, es decir, de un continuo en el cual las figuras pueden desplazarse sin destrozarse o desgarrarse. Un espacio abstracto en toda su generalidad queda definido entonces por la expresión:

$$ds^2 = \sum a_{m,n} dx_m dx_n, \quad (5)$$

y la estructura misma del continuo queda determinada por la manera como se componen los términos de la forma cuadrática. Por otra parte, la estructura del continuo dependerá también del modo como se ordenen, a partir de cada punto, los elementos lineales de la multiplicidad, así como la forma de una superficie en un punto dado, queda fijada por la disposición de los elementos de las curvas que se pueden trazar sobre ella a partir del punto. Se sabe que dos elementos lineales consecutivos fijan la curvatura de una curva sobre la superficie y la curvatura de todas las curvas así trazadas determina la curvatura de la superficie misma. Generalizando este concepto geométrico, Riemann obtiene la noción de lo que designa con el mismo nombre de *curvatura de un espacio*, es decir, la propiedad intrínseca más inmediata, más visible, que caracteriza la estructura de un continuo abstracto alrededor de uno de sus puntos.

El gran matemático demuestra después que la geometría estudiada por Lobatschewsky, es la geometría de los espacios de curvatura negativa y descubre la existencia de espacios de curvatura positiva, que gozan de la propiedad de ser ilimitados pero finitos, es decir, que se cierran sobre sí mismos; o sea, que las líneas geodésicas de la multiplicidad, que son las que desempeñan en un continuo abstracto el papel de las rectas en el espacio euclídeo, si se prolongan indefinidamente acaban por formar un circuito cerrado.

En la geometría de Riemann la suma de los ángulos de un triángulo es siempre mayor que dos rectos y tanto mayor cuanto mayor sea el triángulo.

La geometría de Euclides constituye el caso límite entre las geometrías de los espacios de curvatura positiva y los espacios de curvatura negativa y se considera como la geometría de los espacios de curvatura nula. En estos espacios, la expresión del intervalo entre dos puntos infinitamente próximos se simplifica, pues se anulan los coeficientes  $a_{mn}$  en que  $n > m$  y se hacen iguales a 1 aquellos en que  $n = m$  y queda solo:

$$ds^2 = \sum a_n dx_n^2 \quad (5 \text{ bis})$$

Mucho caudal se ha hecho, para discutir la posibilidad de que nuestro espacio físico posea una estructura distinta de la euclídea, de la imposibilidad de imaginarse un espacio abstracto y, especialmente, de imaginarse el concepto de curvatura espacial. Se arguye, por ejemplo, que, si el espacio tuviera alguna curvatura positiva, sería de dimensiones finitas, idea que repugna abiertamente a nuestro espíritu. Empero, si bien se reflexiona, la creencia en la extensión infinita del espacio es simplemente un engaño de nuestra razón, sin ningún fundamento real, porque la noción del infinito sobrepasa la capacidad conceptiva de nuestra mente.

Debemos acostumbrarnos a convenir en que muchos de nuestros conceptos relativos a la realidad externa son simples convenciones de nuestro espíritu, destinadas a satisfacer cierta tendencia estética y simplista que nos es innata. Esto es lo que pasa, precisamente, con las ideas de espacio infinito y, también, con la creencia muy arraigada en la exactitud y validez absolutas de la ley de la gravitación de Newton. Se trata, efectivamente, de una ley muy sencilla, que parece tener un fundamento racional que va más allá de la experiencia misma. Sin embargo, es fácil hacer ver que, una de dos: o el espacio es realmente infinito y entonces la ley de Newton no puede ser exacta, o esta ley es exacta y entonces el espacio debe ser, necesariamente, de dimensiones finitas. En efecto, como lo ha hecho notar un astrónomo alemán, si el Universo es infinito, la acción gravitacional en un punto cualquiera del espacio sería infinita, y por tanto inaccesible a la experiencia, pues la fuerza atractiva crece en razón directa de las masas, es decir, de los volúmenes o del cubo de las distancias y en razón inversa del cuadrado de las distancias; crece pues con las distancias y para distancias infinitas la atracción sería infinita.

Pero no sólo los espacios de curvatura negativa o positiva, sino aún el Universo cuatridimensional de Minkowski es inimaginable, a pesar de su carácter euclídeo.

Sin embargo, se puede obtener una imagen aproximada de él valiéndose de una representación empleada por el mismo Minkowski en sus memorias, represen-

cruzan caprichosamente en innumerables puntos, que constituyen los hechos observables.

La teoría del Universo de Minkowski representa el punto culminante de la teoría de la relatividad en su primer período.

Ya en este corto transcurso de tiempo las nuevas ideas habían conquistado una brillante falange de partidarios, a cuya cabeza descollaba el gran físico berlinés Max Planck, pero también había sabios que se mostraban decididamente contrarios a la aceptación del principio de relatividad, como una nueva piedra angular de la Física teórica.

Las razones que se aducían en su contra pueden concentrarse en las siguientes observaciones:

1.ª) La teoría perfeccionada de Lorentz explica tan bien como la teoría de Einstein todos los fenómenos electromagnéticos. ¿Es cuerdo entonces apresurarse a aceptar el principio de relatividad y a abandonar en consecuencia, junto con nuestros conceptos intuitivos de tiempo y espacio, al éter, elemento vital de las más avanzadas teorías de la física moderna?

2.ª) La teoría de Einstein no conduce a predecir ningún nuevo fenómeno que no sean capaces de explicar las ideas clásicas. El valor del principio de relatividad, como instrumento de investigación, es entonces, completamente nulo. ¿Qué se saca con introducir la anarquía en una ciencia que ha alcanzado ya un alto grado de perfeccionamiento?

3.ª) La teoría de Einstein no satisface tampoco al principio filosófico de la relatividad de todos nuestros conceptos que se refieren al mundo externo, pues el principio de relatividad de Einstein sólo se refiere a los movimientos inerciales.

La primera objeción pudo ser contestada satisfactoriamente por los relativistas aduciendo la propia opinión de Lorentz, que he citado más atrás, respecto a la notable facilidad y naturalidad con que los fenómenos observados se desprenden de la nueva doctrina. Por lo demás, ha podido argüirse, la ciencia se construye, no sobre hipótesis ad-hoc, como la de Lorentz, sino sobre postulados indemostrables directamente; elementos simplés extraídos de la experiencia e irreductibles a nada más inmediato a la esencia misma del mundo sensible, y tal es el carácter del principio de relatividad. Como observa un físico inglés (1), el método del principio de relatividad es el método de toda ciencia que progresa.

Einstein ha respondido a la segunda objeción haciendo ver que el valor heurístico del principio estriba en que proporciona una condición a la cual deben sa-

---

(1) Campbell: *Modern Electrical Theories*. London 1913. Pág. 383.

matemáticos de donde brota la acción atractiva o repulsiva de las fuerzas naturales; las que, entonces, obran a la distancia e instantáneamente.

Las dos escuelas opuestas, de la acción inmediata y de la acción a distancia, se han disputado porfiadamente el campo de la ciencia física durante el siglo pasado. En los primeros diez lustros la acción a distancia reina sin contrapeso en la electricidad, el magnetismo y la física molecular, pero es desterrada de la óptica y del calor. En los últimos diez lustros la teoría de la acción por contacto vence en toda la física. Pero este triunfo no es completo ni definitivo: por poco que se ahonde en el estudio de los procesos físicos se verá aparecer necesariamente la acción a distancia, la fuerza inmaterial que permite la trasmisión de las influencias de una porción de materia sobre otra; y si se quiere a toda costa abandonar esta noción de fuerza, se verá el sabio conducido como lo fué Hertz en su inmortal obra póstuma: «*Die prinzipien des Mechanik in neuen Zusammenhang dargestellt*», a admitir la existencia de masas ocultas, puramente imaginarias, como recurso matemático para reducir los fenómenos materiales a acciones de contacto inmediato.

Einstein se planteó la cuestión de la siguiente manera: ¿es posible llegar a conocer el estado de movimiento acelerado de un sistema de referencia por medio de observaciones realizadas exclusivamente dentro del sistema? o bien, en otras palabras, ¿un observador encerrado en una caja podrá de alguna manera llegar a distinguir si la caja se halla animada de un movimiento inercial o posee un movimiento acelerado?

Tratemos de contestar la pregunta. Para esto imaginemos una caja aislada en el espacio, a una gran distancia de cualquier cuerpo celeste. Supongamos que un observador se instale dentro, con los aparatos de mecánica y física que crea necesarios para resolver el problema propuesto. El, seguramente, estudiará el movimiento de los cuerpos que lance al espacio interior de su laboratorio, y la marcha de los rayos luminosos, y observará que tanto éstos como aquéllos se propagan en línea recta con velocidad uniforme. Al mismo tiempo notará que todas las cosas que lo rodean, y él mismo, carecen de peso. Matemáticamente esto se expresa diciendo que el potencial del campo de gravitación en que se mueve la caja es constante.

Supongamos ahora que desde afuera se le imprime a la caja un movimiento acelerado, para concretar las ideas, digamos uniformemente acelerado. ¿Qué pasará? Que el observador verá que sus cuerpos que antes seguían una línea recta, al lanzarlos al espacio, siguen ahora una curva que reconocerá ser una parábola y, por tanto, verá caer los cuerpos en una dirección que será precisamente la contraria al movimiento impreso a la caja y todos los cuerpos caerán, naturalmente, con la *mis-*

da enunciando un nuevo principio físico que constituye una de las piedras angulares de la Teoría generalizada de la relatividad. Einstein postula el siguiente principio que designa con el nombre de «*Principio de Equivalencia: En un campo gravitacional los procesos físicos se desarrollan exactamente como si se realizasen relativamente a un sistema de referencia acelerado*».

De acuerdo con este postulado que, como todos los postulados de la Física, sólo puede verificarse indirectamente por sus resultados, «los efectos producidos por un campo de gravitación pueden siempre interpretarse por un estado de aceleración de los cuerpos, sustraídos a todo campo de fuerza, y recíprocamente. De esto resulta que la existencia de un campo de gravitación en el espacio es puramente relativa; depende de la cuestión, insoluble experimentalmente, de saber si el sistema desde donde se le considera está en reposo o en movimiento acelerado...» (1).

Como consecuencias inmediatas del principio de equivalencia se tienen la exacta proporcionalidad entre la masa inerte y la masa ponderable de todos los cuerpos y la pesantez de la luz, o sea, de la energía libre. Pero se presenta otra consecuencia importante: así como los cuerpos, al caer hacia la Tierra, aumentan constantemente de velocidad, la luz, al atravesar un campo gravitacional debe aumentar paulatinamente de velocidad y, por tanto, el principio de equivalencia es inconciliable con uno de los fundamentos primordiales de la teoría de la relatividad enunciada por Einstein en 1905: la constancia de la velocidad de la luz para todo sistema de referencia. «El nuevo principio no puede ponerse de acuerdo con el principio restringido de relatividad; yo fui así conducido, dice Einstein a mirar la teoría de la relatividad en su sentido estrecho como no conviniendo más que a dominios al interior de los cuales no hay diferencias perceptibles de potencial de Gravitación. La teoría enunciada debía ser reemplazada por una teoría generalizada que la comprendiese como caso límite».

(Continuad).

---

(1) Rougier: loc. cit. pág. 94.