



La teoría de la relatividad *en la vida cotidiana'*

Jorge I. Zuluaga

Introducción

La ciencia de frontera se asocia comúnmente con fenómenos con los que estamos muy poco familiarizados o que son del dominio de experiencias extremas y extrañas. La teoría cuántica y todos sus derivados, y por supuesto la teoría de la relatividad, son dos ejemplos en la física en la que esta situación es patente. La teoría cuántica, nos dicen, describe fenómenos a los que nuestros sentidos no tienen acceso, objetos del micromundo que no podemos percibir con facilidad. En el caso de la teoría de la relatividad, nos cuentan, las cosas sólo se empiezan a notar si vamos a velocidades extremadamente altas o si estamos en presencia de campos gravitacionales increíblemente intensos. Pero, ¿es cierto, como parece deducirse de estas prácticas, que las dos teorías que están en la base de la física y la tecnología contemporánea tengan un rango limitado de aplicabilidad? Ciertamente no. ¿Por qué las limitamos entonces a rangos restringidos de aplicabilidad cuando se habla de ellas con el público y, peor aún, cuando se educa en estas áreas? La respuesta es sencilla: las teorías que las preceden siguen siendo “útiles”, “efectivas” en aquellos dominios de la vida en los que nos movemos la mayoría de nosotros.

Parece una torpeza que tratemos de explicar algo que ocurre en un dominio cotidiano usando una teoría sofisticada y poderosa en lugar de usar la versión efectiva de esa misma teoría (“matar un zancudo con un cañón”), y, sin embargo, no lo es. No solamente los conceptos de la nueva teoría son distintos a los de la teoría efectiva que reemplaza y deberían, por la misma razón, utilizarse para explicar todos los fenómenos sin excepción, sino que además hay situaciones en las que las teorías efectivas se quedan cortas u ofrecen explicaciones cuyas justificaciones no son satisfactorias ni fundamentales (algo que es inevitable en cualquier teoría científica). A la luz de las nuevas teorías, las mismas situaciones pueden pensarse o explicarse de formas más satisfactorias y completas. Adicionalmente, en nuestro mundo altamente tecnificado es cada vez más común que encontremos fenómenos, incluso en dominios normalmente exclusivos de las teorías efectivas (el mundo macroscópico en el caso de la teoría cuántica o las bajas velocidades

y campos gravitacionales débiles para la teoría de la relatividad), que sólo pueden explicarse a la luz de las nuevas teorías.

Este ensayo es una invitación para mirar el mundo “viejo” con ojos “nuevos”, una invitación para no limitar el rango de aplicabilidad de las nuevas teorías y para intentar usarlas en dominios en los que normalmente no se usan. Qué mejor manera de hacerlo que a través de un ejemplo, el de la teoría de la relatividad. En la primera parte de este ensayo (secciones 1 y 2) presentamos una síntesis de la teoría de la relatividad propuesta desde una perspectiva desde la que es posible, como mostraremos, acercarnos más fácilmente a la vida cotidiana. Las secciones 3 y 4 presentan dos ejemplos concretos en los que la relatividad se puede usar para iluminar fenómenos cotidianos: la caída libre y algunos fenómenos electromagnéticos. Finalmente, en la sección 5 presentamos algunas conclusiones derivadas de este ejercicio.

1. Relativo o no relativo, ésa es la cuestión

Si pudiéramos resumir en pocas palabras la teoría de la relatividad, podríamos decir que es una búsqueda de lo que en el mundo es relativo y aquello que no lo es. Saber que hay cosas relativas es casi obvio, pero encontrar las que no lo son es justamente el trabajo poco comprendido de la teoría de la relatividad.² Por relativo nos referimos a aquellas cosas cuyas cualidades cambian de acuerdo al punto de vista con el que las observamos. Por ejemplo, el lugar que ocupa una cosa en el mundo depende de quién la describa. Para los colombianos, México está al norte, pero para los canadienses está al sur. Por otro lado, no es relativo o absoluto aquello que no depende del punto de vista (físicamente hablando): tanto para los colombianos como para los canadienses la población de México es la misma, no importa si lo vemos al norte o al sur.

Una búsqueda como ésta no puede ser tan reciente como para llamarla una teoría nueva. En realidad, la búsqueda de lo relativo y lo no relativo en la física viene desde los trabajos pioneros de Galileo en el siglo XVII y posteriormente estará presente también en las ideas fundamentales de Newton sobre el movimiento. La novedad introducida por Einstein, Lorentz, Poincaré y otros contemporáneos suyos que se consideran

actualmente tan importantes en el nacimiento de la teoría como el primero, consistió en descubrir que algunas cosas que en el contexto de la relatividad galileana y newtoniana eran relativas son en realidad absolutas y a la inversa: cosas que se consideraban antes absolutas por principio, resultan ser relativas en la perspectiva de la nueva teoría de la relatividad. En la nueva teoría, que llamaremos en lo sucesivo teoría de la relatividad moderna o simplemente teoría de la relatividad, cumplen un papel fundamental el electromagnetismo y sus principales resultados, como fueron compilados por James Clerk Maxwell y Hendrik Lorentz en el siglo XIX y que obviamente eran desconocidos para Galileo y Newton.

Algunas cosas que son relativas por razones fáciles de entender son la posición, el tiempo o la hora en la que ocurre un fenómeno, el estado de movimiento, la velocidad y aceleración de la mayoría de los cuerpos, las direcciones, la energía o los campos. Por razones menos obvias, la relatividad moderna descubre que también son relativos el tamaño de las cosas, la distancia espacial entre dos puntos, la duración de los fenómenos, la densidad y la existencia de ciertos campos.

Absolutos son el número de cosas que hay en un lugar o en una región del espacio (¡pero no su densidad!), la masa o la carga de una partícula y las leyes que rigen el mundo. No importa nuestro punto de vista como observadores, nuestro lugar, orientación o estado de movimiento, todos coincidimos en que estas cosas son las mismas. Lo que no sabíamos antes de Einstein es que también es absoluta la velocidad de la luz. Sin importar cómo nos movamos en relación con una fuente luminosa, si ella se acerca o se aleja de nosotros, siempre veremos la luz que sale de la fuente moverse invariablemente a 300.000 km/s.

Pero la teoría de la relatividad es ciertamente mucho más que una enumeración de lo que cambia y lo que no cambia con nuestro punto de vista. Esta teoría es en realidad, entre otras cosas, una colección de reglas que nos permiten juzgar si una cualidad o cantidad es relativa o no y, cuando lo es, predicen cómo cambiaría si nos situáramos en otro sistema de referencia.

¿Cuál es el secreto o la clave de la teoría de la relatividad moderna que le permite realizar el juicio de lo que es relativo y lo que no lo es? La

respuesta es sencilla pero completamente novedosa: todo en el mundo tiene una existencia más allá de lo que nuestros sentidos e instrumentos perciben. El mundo y todo en él tiene cuatro dimensiones inseparables, de las que nos hemos especializado en percibir por separado tres de ellas como espacio (altura, anchura y profundidad) y la cuarta como tiempo. El descubrimiento fundamental de Poincaré y Einstein es que ese mundo de cuatro dimensiones es indivisible y tiene propiedades nuevas. Lo relativo surge cuando fragmentamos ese todo indivisible. Muchas de las predicciones fascinantes de la relatividad a las que estamos acostumbrados en la divulgación y en los textos de ciencia ficción surgen justamente de considerar por separado el espacio y el tiempo para fenómenos que ocurren realmente en el espacio-tiempo.

2. Viendo en profundidad

Cuando decimos que el mundo tiene cuatro dimensiones nos referimos a que cualquier cosa dentro de él puede moverse en cuatro direcciones independientes: adelante/atrás, izquierda/derecha, arriba/abajo (espacio) pero también hacia el futuro (tiempo).³ Éste no es un descubrimiento fundamental, es simplemente una manera no muy popular de describir el mundo. Sin embargo, es el punto de partida para los descubrimientos fundamentales de la teoría de la relatividad, descubrimientos que están relacionados con las propiedades geométricas de ese escenario cuatridimensional.

La diferencia entre pensar el mundo en tres o en cuatro dimensiones es similar a la que existe entre la manera de ver una película de cine desde la perspectiva de un espectador en una sala de cine o desde la perspectiva del director de la película, respectivamente. Para quienes nos sentamos cómodamente en una sala de cine, la acción transcurre ante nuestros ojos sobre la superficie de la pantalla. Las escenas se suceden en el telón (espacio) a medida que nos comemos las crispetas (tiempo). Para un director de cine la película es más una sucesión de fotografías, cuidadosamente escogidas y alineadas una al lado de la otra en una cinta. La acción no solamente sucede sobre la superficie de cada fotograma (espacio) sino también en la dirección en la que

van apareciendo los fotogramas en el carrete de la película (tiempo). Éste es el secreto del cine. Los espectadores somos afortunadamente engañados por el equipo proyector que lanza sobre una pantalla una sucesión de instantáneas que se unen a través del recuerdo para producir la sensación de una acción continua.

El mundo cuadrimensional en el que vivimos es como una película, pero en la mayoría de las ocasiones actuamos solamente como espectadores: percibimos las cosas en el espacio tridimensional y las recordamos conforme se van sucediendo en el tiempo. De acuerdo a la teoría de la relatividad, como espectadores le damos un valor exagerado a la porción instantánea que estamos percibiendo (espacio) o a los recuerdos de esas porciones (tiempo). Es necesario pensar el mundo como directores de cine, capaces, si no de percibir, al menos de imaginar y concebir la totalidad de la acción en el espacio-tiempo.

Para ilustrar nuestro punto, usaremos la versión del director de un corto de la película *El circo* de Charles Chaplin (1928). En el corto, Chaplin asciende ágilmente por una de las vigas del circo hasta la parte alta de la carpa. En la figura 1 se muestra la escena dividida en fotogramas, una representación que llamaremos en lo sucesivo “diagrama espacio-temporal”. En el espacio-tiempo de cuatro dimensiones, los fenómenos y los objetos son cuadrimensionales también. El Charles Chaplin de la figura no es solamente una entidad tridimensional, sino que barre en el espacio-tiempo un camino al que llamaremos “línea de universo” (línea amarilla en la figura 1). Chaplin y su línea de universo son uno solo con un conjunto de propiedades que son susceptibles de ser relativas o absolutas.

¿Cuáles son las propiedades de los objetos y los fenómenos en cuatro dimensiones? Diferenciaremos aquí algunas propiedades cuadrimensionales de sus análogas en el espacio y el tiempo, antecediendo a su nombre tradicional el prefijo cuatri. Podemos hablar de la “cuadrilongitud” de una línea en cuatro dimensiones, o de la “cuadrivelocidad” a la que se mueve una partícula en el espacio-tiempo. ¿Cómo se miden estas “cuatripropiedades”? Sin saberlo, estamos familiarizados con algunas de ellas (la masa, por ejemplo, está relacionada con una cuatripropie-

dad de los cuerpos), pero de otras sólo percibimos parcialmente sus proyecciones en el espacio y en el tiempo. Esta es una situación que nos recuerda la filosofía de Platón: nuestros sentidos e instrumentos nos muestran apenas la sombra de lo que son realmente las cosas en el espacio-tiempo.

En la situación planteada con *El circo* de Chaplin, la línea de universo que él recorre en el espacio-tiempo (línea amarilla en la figura 1) tiene una “cuadrilongitud”. Asimismo, Chaplin, como objeto, tiene asociada una “cuadrivelocidad”. Tanto la cuadrilongitud de la línea de universo como la cuadrivelocidad de Chaplin no pueden ser percibidas o medidas fácilmente cuando describimos el mundo como espectadores en una sala de cine. En esta situación sólo podemos ver versiones parcializadas de esas propiedades, componentes o proyecciones tanto en el espacio como en el tiempo. En otra analogía, el mundo se convierte en un espectáculo de marionetas de sombras: los niños ven las figuras proyectadas de las marionetas sobre la pantalla o en el techo del teatro, pero no pueden percibir la forma y el tamaño reales de la marioneta tridimensional que está sosteniendo el titiritero.

La cuadrilongitud de la línea de universo de Chaplin tiene un componente espacial: su proyección o sombra sobre el espacio, igual a la altura de la carpa, así como un componente temporal que es proporcional a la duración del corto de la película. Las dos cosas, la altura de la carpa y la duración del corto, nos parecen propiedades separadas. Pero no es así, las dos son una proyección de una única entidad en el espacio-tiempo, la línea de universo, con una propiedad fundamental, su cuadrilongitud.

El tiempo se dilata

¿Qué pasa si nos situamos en otro sistema de referencia? O más bien, como se diría en términos cinematográficos, ¿cómo se vería la acción si se filmara con otra cámara? Una toma muy diferente se conseguiría con una cámara montada sobre el hombro de Chaplin (sistema de referencia comóvil o propio). En la figura 2 se muestra el resultado del cambio de cámara. En este caso la línea de universo en un diagrama espacio-temporal aparece horizontal: el espectador vería a Chaplin quieto en el espacio mientras pasa el tiempo.

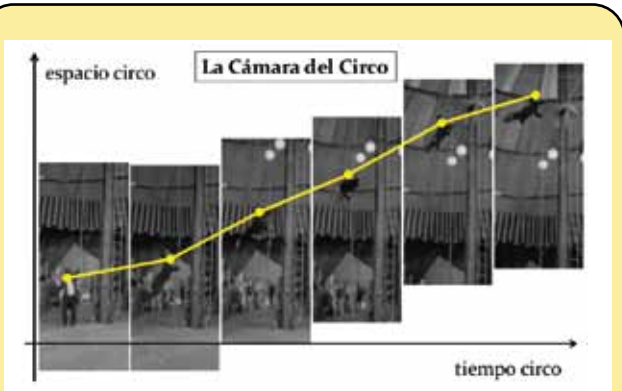


Figura 1. Escenas de la película *El circo* de Charles Chaplin puestas en sucesión, como se verían en una cinta cinematográfica. En esta representación, la acción de la película sucede en la carpa de un circo que se extiende en dirección vertical (espacio). Las escenas correspondientes a tiempos diferentes se extienden en dirección horizontal (tiempo). Llamaremos a esta representación pictórica de la acción un diagrama espacio-tiempo.

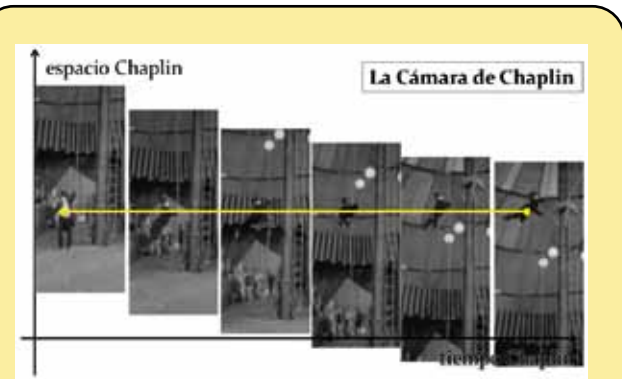


Figura 2. La misma situación de la figura 1 pero percibida por una cámara fija en Chaplin (sistema de referencia comóvil o propio).

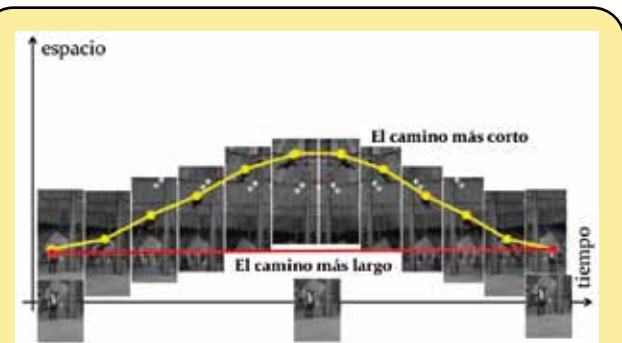


Figura 3. Continuación de la escena del circo, suponiendo ahora que un hipotético maestro de ceremonias, gemelo de Chaplin, hubiera permanecido en reposo en el escenario mientras Chaplin sube y vuelve a descender de lo alto de la carpa.

¿Han cambiado las propiedades fundamentales de la línea de universo de Chaplin al cambiar de cámara? Si la respuesta fuera afirmativa, estaríamos de alguna manera admitiendo que un cambio de cámara arbitrario sería capaz de modificar lo que los objetos son en el espacio-tiempo. Este dilema se conoce en la geometría desde hace mucho tiempo: si se toma un objeto geométrico en el espacio y se lo mira desde ángulos diferentes (rotaciones), ¿sus propiedades intrínsecas (longitud y área, por ejemplo) cambian? Allí la respuesta categórica es no. Si asumimos que éste es el caso también en el universo, es decir, que al cambiar de cámara no cambia, por ejemplo, la cuadrilongitud de una línea de universo, las consecuencias resultan ser fantásticas. Estas consecuencias son justamente lo que mejor recordamos de la teoría de la relatividad.

¿Cómo se calcula o mide la cuadrilongitud de una línea de universo? El físico-matemático francés Henri Poincaré fue el primero en mostrar que para que la cuadrilongitud de las líneas de universo en el espacio-tiempo fuera absoluta, es decir, que no se modificara al cambiar de cámara o de sistema de referencia, ella debería relacionarse con su proyección en el espacio (distancia) y en el tiempo (duración) a través de esta fórmula:⁴

$$(\text{cuadrilongitud})^2 = (\text{duración})^2 - (\text{distancia})^2$$

Esta fórmula nos recuerda el teorema de Pitágoras con una variante: el cuadrado de los catetos (que son las sombras o proyecciones de la hipotenusa), en lugar de sumarse, se restan. ¿Hay acaso aquí un error? No, lo que tenemos en frente es uno de los descubrimientos centrales de la teoría de la relatividad moderna.

Si volvemos sobre el ejemplo de Chaplin en el circo y comparamos la cuadrilongitud medida por la cámara situada en reposo en el circo y por aquella en el hombro de Chaplin, obtenemos:

Cámara del circo:

$$(\text{cuadrilongitud})^2 = (\text{duración circo})^2 - (\text{distancia circo})^2$$

Cámara de Chaplin:

$$(\text{cuadrilongitud})^2 = (\text{duración Chaplin})^2 - (0)^2$$

$$(\text{cuadrilongitud}) = (\text{duración Chaplin})$$

Entonces,

$$\frac{(\text{duración Chaplin})^2}{(\text{duración circo})^2 - (\text{distancia circo})^2} =$$

De aquí se siguen dos resultados importantes. El primero es que la cuadrilongitud de una línea de universo puede ser medida con un instrumento mundano: un reloj que viaje siguiendo la misma línea de universo (reloj comóvil o propio).⁵ El otro resultado es sorprendente y fascinante: la duración de la escena medida por la cámara de Chaplin es menor que la misma duración medida por la cámara del circo. En conclusión, aunque la cuadrilongitud de la línea de universo de un fenómeno es absoluta, su duración en el tiempo es relativa. A este fenómeno se le denomina “dilatación relativista del tiempo”.⁶

Una consecuencia interesante de este curioso resultado se puede derivar si dejamos que en la película Chaplin descienda desde lo alto de la carpa del circo (figura 3). Si seguimos la línea de universo de Chaplin y la de un hipotético maestro de ceremonias, un hermano gemelo suyo que se queda durante toda la escena en el mismo punto, notaremos que las líneas de universo de ambos son muy diferentes pero comparten los mismos puntos terminales (líneas amarilla y roja en la figura 3). Ahora bien, en el espacio-tiempo, ¿cuál de esas líneas es la más larga (tiene mayor cuadrilongitud)? Examinando el argumento anterior, podemos concluir sin problemas que el gemelo en reposo en el circo recorre el camino más largo en el espacio-tiempo. Dado que la longitud del camino es igual a la duración registrada por los relojes que estaban en las muñecas de ambos (relojes comóviles), podemos decir también que para el maestro de ceremonias pasó más tiempo en su muñeca que el que pasó en el reloj de la muñeca de Chaplin: al terminar el experimento, ¡Chaplin habrá envejecido menos que su gemelo maestro de ceremonias!

Este resultado, comúnmente citado en la literatura como la paradoja de los mellizos y que es fuente de inspiración para historias de ciencia ficción y planes de viajes interestelares, no es tan interesante como este otro: en el espacio-tiempo los observadores “libres”, aquellos sobre los que no actúa ninguna fuerza neta (como el maestro

de ceremonias en reposo), recorren en el espacio-tiempo la distancia más larga.⁷

En el espacio-tiempo, los caminos de menor esfuerzo (líneas rectas generalizadas o geodésicas) son en realidad más largos que los caminos forzados. Tomaremos nota de este resultado para explicar el siguiente fenómeno relativístico.

3. Sufriendo la relatividad

Probablemente la aplicación más directa de la teoría de la relatividad en fenómenos cotidianos es aquella que permite explicar y describir la caída de los cuerpos.

3.1. La “fuerza” gravitacional en crisis

¿Por qué caen los cuerpos hacia la Tierra? Según la reconocida Teoría de la Gravitación Universal, formulada por Isaac Newton en 1687,⁸ todos los cuerpos en el universo experimentan una atracción mutua que actúa sin importar la distancia y el tiempo que los separe. La teoría dice que esta atracción es precisamente la responsable de que las cosas en la superficie de la Tierra caigan hacia ella.

A pesar de cosechar éxitos por casi 250 años, la teoría de la gravedad de Newton sufre de una serie de defectos poco publicitados en círculos educativos y divulgativos. En primer lugar, es incapaz de explicar algunas anomalías bastante notables en el movimiento de los planetas.⁹ Pero los planetas están bastante lejos de la vida cotidiana, de modo que nos olvidamos fácilmente de este defecto. Más notable aún es que la teoría recurre a una serie de hipótesis que no justifica y que, si bien tiene el derecho a enunciar, le da una cualidad poco económica que no es apreciada en la ciencia.

La teoría propone, en primer lugar, la hipótesis de que la atracción gravitacional puede actuar a distancias increíbles de forma instantánea. Según la teoría newtoniana, si retiráramos a la Tierra de su lugar, la Luna, a 384.000 kilómetros de distancia, se enteraría inmediatamente de su ausencia y saldría disparada hacia el espacio interplanetario.

Otra predicción curiosa de la teoría gravitacional de Newton tiene que ver directamente con la caída libre. Según la teoría, la intensidad de

la atracción crece con la “masa gravitacional” de un cuerpo, una propiedad única de la materia cuando está en presencia de la gravedad. Sin embargo, esta idea implicaría que los cuerpos más masivos gravitacionalmente deberían caer de forma más expedita al suelo, algo que todos intuimos sin dificultad. Desde tiempos de Galileo se sabe que la aceleración con la que caen cuerpos de distinto tamaño es exactamente la misma:¹⁰ si se sueltan un ladrillo y un lápiz desde cierta altura caerán casi al mismo tiempo, no importa que el primero sea atraído por la Tierra con una intensidad 50 veces mayor. En un experimento histórico, el astronauta Dave Scott dejó caer en la Luna un martillo y una pluma para probar esta reconocida propiedad de la gravedad justo allí en el vacío, donde el aire no podía interferir con el experimento.¹¹ El resultado es concluyente: el martillo y la pluma caen al mismo tiempo.

¿Qué dice Newton sobre esta situación contradictoria? Su salida es ingeniosa pero tiene un precio alto: una hipótesis nueva. Newton afirma que así como la intensidad de la gravedad crece en proporción directa a la masa gravitacional del cuerpo, la resistencia a moverse crece con su “inercia” cuantificada por la denominada “masa inercial”; si ambas cantidades, masa gravitacional e inercial son *exactamente* iguales, el misterio queda resuelto.

En conclusión, la teoría de la gravitación de Newton explica la caída de los cuerpos pero obligándonos a aceptar, primero, que existe una misteriosa acción a distancia que llamamos fuerza gravitacional y, segundo, que dos propiedades aparentemente independientes de los cuerpos son numéricamente idénticas sin importar la composición y estructura de esos mismos cuerpos.

3.2. Una nueva mirada a la gravedad

Vivimos 250 años con estas incómodas propiedades de la teoría newtoniana de la gravedad, obviándolas por momentos para explicar a nuestros niños y estudiantes cómo funcionaba el mundo ante la ausencia de una mejor explicación. En 1916, después de once años de intenso trabajo, Albert Einstein al fin se topó con una explicación que no requería de las hipótesis anteriores, que corregía los defectos observados en la explicación newtoniana y que además predecía la existencia de una cantidad fascinante de

fenómenos nuevos que hemos podido observar desde ese entonces.

Si examinamos la caída del martillo en el experimento del astronauta en un diagrama espacio-temporal, podemos ilustrar la explicación elegante de Einstein al fenómeno gravitacional. Como se puede apreciar en la figura 4, el martillo describe en el espacio-tiempo realmente una trayectoria curva. La caída en línea recta al piso es la “ilusión espacial” que se produce porque nuestros instrumentos y sentidos no perciben el movimiento espacio-temporal. En términos descriptivos, podríamos decir que los cuerpos caen moviéndose en trayectorias curvilíneas en el espacio-tiempo.

La pregunta entonces no es por qué caen las cosas sino por qué cerca de la Tierra o la Luna los cuerpos, cuando son dejados libres, siguen líneas curvas en el espacio-tiempo. La respuesta de la teoría de la relatividad es ingeniosa y simple: en el espacio-tiempo que rodea los cuerpos como la Tierra o la Luna, las líneas de universo de los cuerpos libres son “curvas”.

En el ejemplo de Chaplin, donde no consideramos los efectos de la gravedad, los cuerpos libres seguían caminos rectos, aunque más largos, en el espacio-tiempo. Éste fue un resultado producto de las leyes geométricas del espacio-tiempo dictadas por Poincaré, Einstein y Minkowski. Si en la situación del martillo, donde la gravedad es protagonista, los cuerpos libres siguen trayectorias curvas, podríamos decir que se operó un cambio en las leyes geométricas del espacio-tiempo. ¡EUREKA!: la gravedad entonces sería la manifestación de una alteración geométrica del espacio-tiempo.

No hay ninguna atracción física entre la Tierra y los cuerpos que la rodean. No existe una fuerza viajando instantáneamente de la Tierra hasta la Luna y los cuerpos cerca de ella. Podríamos decir, sin alejarnos mucho de la realidad expresada por la teoría de la relatividad, que los cuerpos caen al piso porque sí, porque son dejados a su suerte en un espacio-tiempo deformado. El paso del tiempo (una ilusión más de nuestra falta de perspectiva espacio-temporal) hace que los veamos aproximarse a la Tierra como si fueran atraídos misteriosamente por ella. Podríamos decir también que los cuerpos caen porque envejecen en un espacio-tiempo “curvo”.

Dos propiedades de la gravedad esperan una explicación en esta renovada visión de la caída libre: por qué los cuerpos “pesan”, es decir, por qué hay que sostenerlos con fuerza para que no caigan, y por qué todos los cuerpos dejados a su suerte caen al mismo tiempo.

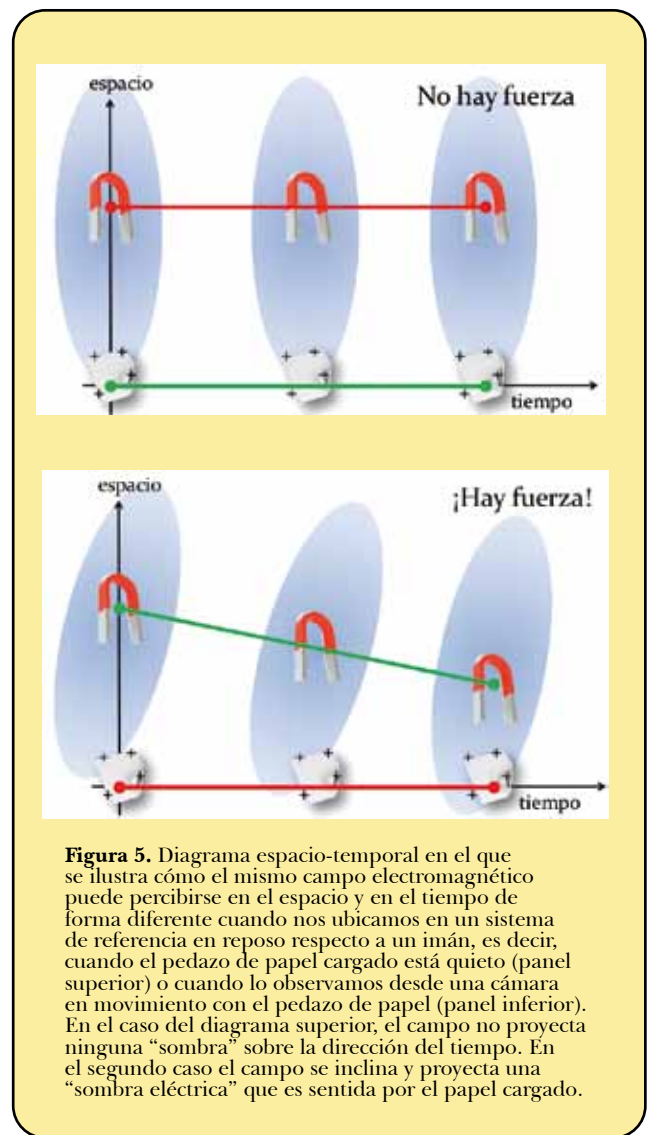
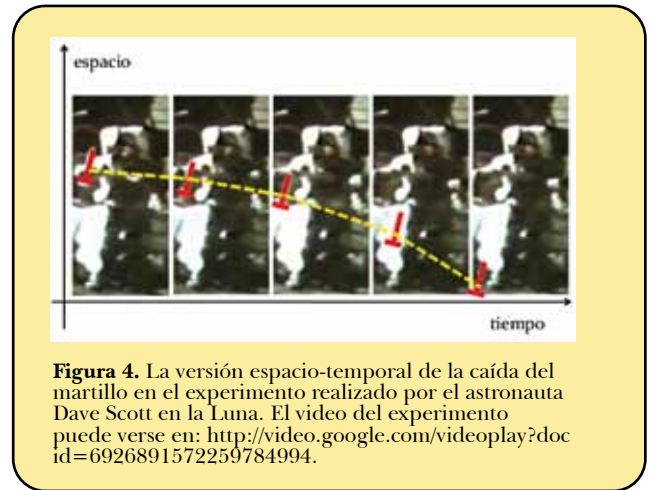
El peso puede entenderse con una analogía espacial. Para hacer que una piedra gire atada a una cuerda alrededor de nosotros tenemos que obligarla con una fuerza a moverse sobre el círculo. En el espacio, la piedra “tiende” a moverse en línea recta (algo que llamamos movimiento inercial), pero al aplicar una fuerza la obligamos a moverse contra “su voluntad” en una curva. Sucede lo mismo en el espacio-tiempo alrededor de la Tierra: la única manera para hacer que un cuerpo siga una línea de universo recta en el espacio-tiempo distorsionado es obligándolo con una fuerza. Esa es la fuerza que siento presionando mis glúteos cuando estoy sentado y que me obliga a mí también a seguir el camino no natural del reposo en un campo gravitacional. Estas son las únicas fuerzas “verdaderas” en la novela de la gravedad.

La explicación de por qué los cuerpos caen al mismo tiempo no requiere tampoco ahora suponer hipótesis adicionales. Sencillamente cuando dos cuerpos se dejan en libertad en el espacio-tiempo alrededor de la Tierra, el camino que siguen está dictado solamente por las propiedades de ese espacio-tiempo y no depende de las propiedades de los cuerpos en sí mismos. Sin importar el tamaño, la composición, la forma o la estructura, todos los cuerpos libres siguen los mismos caminos en el espacio-tiempo. A esta idea se la conoce como el “principio de equivalencia”.¹²

3.3. La brújula del siglo XXI

Un “corolario” increíble se sigue de esta formulación geométrica de la gravedad, dejando una huella importante en nuestra vida cotidiana.

Si lanzamos un objeto al espacio en un campo gravitacional (un satélite, por ejemplo) y el cuerpo asciende y desciende sin resistencia (movimiento libre), sabemos por todo lo anterior que la longitud de su línea de universo será mayor que la que sigue un observador en la Tierra que comparta los mismos eventos inicial y final. Si recordamos que la cuadrilongitud de una línea de



universo está relacionada con el tiempo que marcan los relojes que viajan con ambos observadores, debemos entonces concluir que el reloj en el vehículo que se eleva marcará una duración mayor para su vuelo. Esa duración mayor, que ahora sabemos es producto de la distorsión del espacio-tiempo debida a la presencia de la Tierra, se puede describir con otras palabras: los cuerpos que vuelan “arriba” en un campo gravitacional perciben que los mismos fenómenos duran más que como los perciben los cuerpos que están “abajo” en el mismo campo. A este fenómeno se lo conoce como “dilatación gravitacional del tiempo”.

¿Puede este fenómeno percibirse o afectar nuestra vida cotidiana? Aparentemente no. Aunque no hemos hecho un esfuerzo por cuantificar detalladamente los efectos descritos aquí, bastará con decir que la magnitud de este efecto es muy pequeña para casi todos los efectos prácticos, excepto para aquellos en los que la medida exacta de las duraciones es un factor crítico. Un aparato tecnológico cada vez más importante en la vida diaria depende de forma crítica de la medida del tiempo: el GPS.

Los principios básicos del sistema de posicionamiento global (GPS para la tecnología usada por los Estados Unidos, o Galileo para la usada por los europeos) son simples. Una “constelación” de satélites dotados de relojes de alta precisión orbitan a la Tierra. Cuando un GPS, instalado en un teléfono celular o en los instrumentos de un avión o un barco, o puesto a la vista de un taxista, recibe la señal de al menos tres satélites de la constelación, compara internamente la diferencia entre el tiempo de viaje de cada señal. Esa diferencia, que se debe al hecho de que a la señal le tomó un tiempo diferente viajar las diversas distancias que separan a los satélites del dispositivo, le permite al instrumento triangular su posición en el espacio a partir, naturalmente, del conocimiento preciso de la posición de los satélites.

Dado que los satélites están a una altura diferente a la del aparato GPS sobre la Tierra, pero también debido a que se mueven respecto a ese mismo aparato, los tiempos que marcan los relojes propios de los satélites y el dispositivo diferirán en las duraciones en una magnitud que sólo puede calcularse con la teoría de la relatividad. Si hiciéramos caso omiso a las diferencias en las duraciones percibidas por los relojes, nuestra posición calculada por comparación

de los tiempos de los satélites (que supondríamos en sincronía) resultaría errada.

Si bien un error en la posición de un teléfono celular en una ciudad que no conocemos, producto de no utilizar la teoría de la relatividad en el sistema GPS, podría no ser más que un simple incidente turístico, un avión cargado de pasajeros (entre los que seguramente habremos estado nosotros) que no conoce con precisión su lugar en el espacio podría volar sin rumbo preciso o llegar al destino equivocado. La navegación del siglo XXI está “permeada” de relatividad.

4. Ser o no ser electricidad

Pasando a un problema diferente, existe un fenómeno cotidiano que pocas veces se relaciona con la teoría de la relatividad y al que justamente podríamos considerar una de las consecuencias más útiles de la teoría.

Entre los fenómenos y las propiedades estudiadas más ampliamente desde la teoría de la relatividad, están los fenómenos electromagnéticos. No sobra mencionar que los mismos fenómenos electromagnéticos fueron fuente de buena parte de la inspiración inicial que dio luz a esta teoría. En la física prerrelativista, se reconoce que los fenómenos electromagnéticos son una manifestación de dos campos fundamentales: el campo eléctrico y el campo magnético. El campo eléctrico es producido normalmente por cuerpos cargados eléctricamente: una barra de plástico frotada contra el cabello, la pantalla de un televisor de tubo, las nubes, etc. Así mismo todos los cuerpos cargados puestos en presencia de un campo experimentan una fuerza al interactuar con él. Si se carga eléctricamente una bolita de papel y se acerca a ella una barra de plástico cargada, la bolita “siente” el campo eléctrico producido por la barra y el efecto visible es que es atraída o repelida por ella.

El campo magnético es un poco diferente. En la naturaleza, los campos magnéticos son normalmente producidos por ciertos tipos de minerales conocidos como ferromagnéticos, con los que se construyen imanes y brújulas. De la misma manera que sucede con el campo eléctrico, la materia que produce campos magnéticos puede sentirlos. Cuando un cuerpo ferromag-

nético se pone en un campo magnético, interactúa con él y experimenta una fuerza. Ése es el origen de la atracción o repulsión entre magnetos.

No hay que olvidar, sin embargo, que entre los descubrimientos más importantes del siglo XIX se encuentra el que los fenómenos eléctricos y magnéticos están íntimamente relacionados. Una carga eléctrica que se mueve es capaz de producir un campo magnético. A su vez, un magneto que se mueve es capaz de producir un campo eléctrico. Más interesante aún es que un campo magnético oscilante produce un campo eléctrico oscilante que a su vez da lugar a un campo magnético oscilante, y así sucesivamente. Ésta es la clave de la existencia de las ondas electromagnéticas.

Pero hay un aspecto que podríamos describir como “misterioso” en esa relación entre los campos y la materia que los produce. Dado que el movimiento de los campos o sus fuentes es la clave para establecer la relación entre ellos, y que el movimiento es una propiedad relativa de los cuerpos, surge la pregunta de si la existencia de esos mismos campos podría ser también relativa. Si la existencia de un campo es relativa y depende de la cámara con la que miremos un fenómeno, ¿cómo podría ese campo ser físicamente real?

Un ejemplo notable de esta situación se observa cuando una carga eléctrica aislada (el pedazo de papel del primer caso) se pone en presencia de un campo magnético estático (el producido por un imán, por ejemplo). Dado que las cargas eléctricas no responden a los campos magnéticos estáticos, la carga no sentirá ningún efecto. ¿Qué sucede ahora si el pedazo de papel se pone en movimiento respecto al imán? Experimentalmente se observa que el papel, que antes era indiferente al campo magnético, ahora deja de serlo: por alguna razón el papel parece experimentar una fuerza sólo por el hecho de estar en movimiento dentro del campo. En la física prerrelativista (y aun en las explicaciones modernas de los fenómenos electromagnéticos), a esta fuerza nueva, la que sienten cargas en movimiento en un campo magnético, se la denomina “fuerza de Lorentz”. Lamentablemente no existe en el electromagnetismo clásico una justificación muy clara para el origen de esta fuerza. Se la incluye simplemente como parte de la teoría de

una manera parecida a como Newton introdujo la atracción gravitacional.

Aquí de nuevo la teoría de la relatividad, con su concepción extendida a cuatro dimensiones de las cosas y los campos, vuelve a salir en nuestra ayuda. De la misma manera que una partícula existe en el espacio-tiempo cuatridimensional con su línea de universo, los campos también tienen una existencia extendida más allá de nuestra percepción parcializada del mundo. Una descripción moderna de los campos eléctrico y magnético más coherente con esta visión ampliada nos dice que, en general, en una situación en la que participan cargas eléctricas o imanes se produce un campo “electromagnético” en el espacio-tiempo. Los campos magnético y eléctrico son solamente la “proyección”, la “sombra” en las direcciones espacial y temporal, respectivamente, sobre las que nuestros instrumentos o sentidos perciben el mundo.

No se puede hablar de la existencia per se de campos eléctricos o magnéticos. Existe un campo electromagnético que tiene unas propiedades espacio-temporales absolutas y que, de acuerdo a las condiciones de observación, se manifiesta a través de campos eléctricos y magnéticos.

Cuando decimos entonces que un imán en reposo produce un campo magnético, en realidad lo que estamos diciendo es que el imán produce en el espacio-tiempo un campo electromagnético particular que, observado en reposo, se proyecta sobre nuestro espacio como un campo magnético. El hecho de que en esta situación no registremos un campo eléctrico es sólo un indicio de que la proyección del campo electromagnético en dirección temporal es nula (ver figura 5, panel superior). En estas condiciones, un pedazo de papel con carga eléctrica no sentirá ningún efecto del campo porque la carga sólo siente empatía por la proyección que llamamos campo eléctrico.

Si ahora el papel se mueve, una “cámara” o sistema de referencia que viaje con él verá al mismo campo electromagnético del imán con una “perspectiva” diferente. La proyección de ese campo electromagnético en la dirección temporal en el sistema de referencia del papel ahora no es nula y, por lo tanto, el pedazo sentirá la presencia de un campo eléctrico y por la misma razón experimentará una fuerza. Esa fuerza es

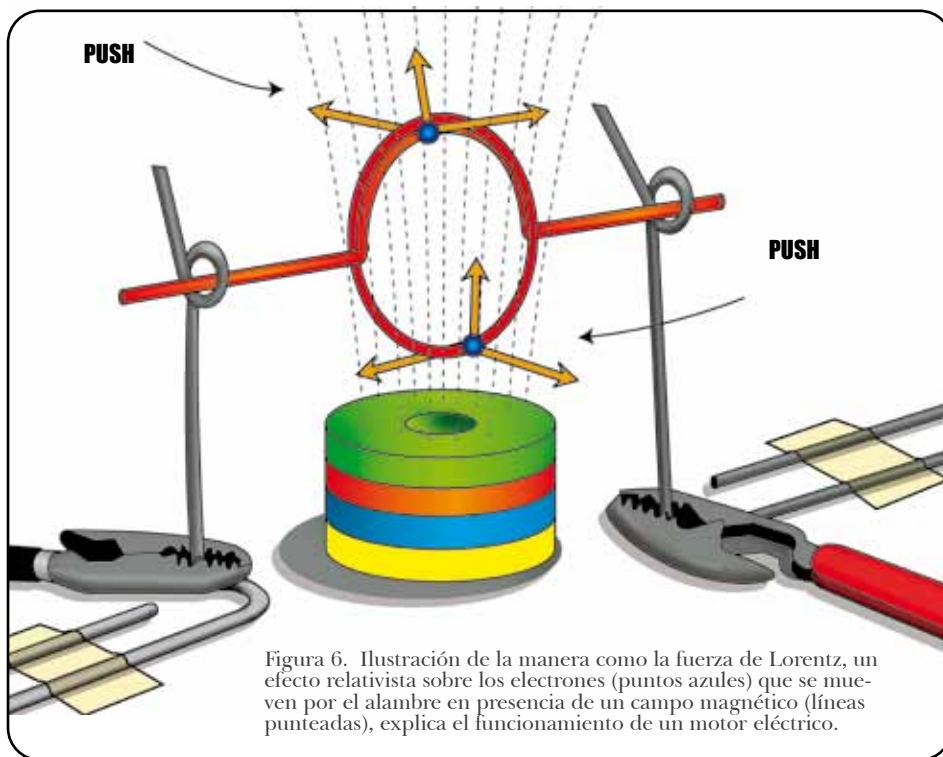


Figura 6. Ilustración de la manera como la fuerza de Lorentz, un efecto relativista sobre los electrones (puntos azules) que se mueven por el alambre en presencia de un campo magnético (líneas punteadas), explica el funcionamiento de un motor eléctrico.

precisamente la fuerza de Lorentz. Lo que nos parece una fuerza “mágica” no es sino un cambio de perspectiva en el espacio-tiempo.

En nuestra vida cotidiana, ¿dónde se manifiesta la fuerza de Lorentz? Nuestro mundo está invadido de dispositivos electromagnéticos, y no hay que pensar mucho para encontrar una situación en la que esta fuerza sea protagonista. El motor eléctrico es un buen ejemplo. En una versión simplificada de un motor eléctrico se hace pasar una corriente eléctrica (un río de cargas eléctricas puntuales, los electrones) a través de un alambre enrollado (espira) que está expuesto a un campo magnético estático.¹³ En la figura 6 se ilustra el funcionamiento básico de este dispositivo. Cuando los electrones se mueven en presencia del campo, sienten la fuerza de Lorentz (es decir, ven el campo electromagnético desde otra perspectiva e interactúan con su “sombra eléctrica”) y tratan de desviarse de su camino recto, con tan mala suerte que chocan con los átomos del material y le imprimen al alambre un movimiento rotacional. Ese movimiento puede ser transferido por un eje a cualquier objeto: unas paletas en una licuadora, las aspas de un ventilador o un secador, etc., creando lo que conocemos como un motor eléctrico.

En resumen, la combinación de una corriente eléctrica, un campo magnético y la fuerza de

Lorentz, una silenciosa mensajera del espacio-tiempo, son, esencialmente, los responsables de poner en movimiento una buena parte del mundo que nos rodea.

5. Conclusiones

Como mostramos en este ensayo, la visión renovada del mundo que nos ofrece la teoría de la relatividad no solamente es útil para describir fenómenos exóticos y lejanos a la vida cotidiana. Usando conceptos nuevos de la teoría, tales como el reconocimiento de un espacio-tiempo de cuatro dimensiones, la existencia de propiedades espacio-temporales que se manifiestan como proyecciones en el espacio y el tiempo en la forma de propiedades convencionales, la interpretación del fenómeno gravitacional como un fenómeno geométrico, etc., es posible volver a revisar algunos fenómenos de la vida diaria que normalmente analizamos y explicamos a la luz de teorías clásicas.

Si bien nuestro mundo inmediato puede ser explicado coherentemente en el marco de esas teorías anteriores —explicaciones que repetimos a diario en los salones de clase y en los medios divulgativos—, para el autor no existe una justificación clara de por qué no debemos renovar esas mismas explicaciones a la luz de los conceptos de las nuevas teorías.

Así como en el contexto técnico las teorías científicas cambian y el quehacer científico se adapta a esos cambios, también deberían cambiar las explicaciones que damos a los fenómenos del mundo en las aulas de clase o en los medios divulgativos. Solamente a través de un esfuerzo educativo y divulgativo generalizado, que implique traer teorías nuevas al nivel de la experiencia cotidiana, es que lograremos que esas teorías pasen a formar parte del patrimonio intelectual de todos los seres humanos y no solamente de aquellos “iniciados” capaces de entender la versión rigurosa de esas mismas teorías.

Así lo hicimos en el pasado con las que en su tiempo fueron novedosas y complejas teorías, como el modelo heliocéntrico copernicano y la teoría del movimiento de Newton, para citar dos ejemplos. Debemos hacer lo mismo ahora con la teoría cuántica y la teoría de la relatividad. ■

Jorge I. Zuluaga (Colombia)

Ph.D. Profesor Asistente del Instituto de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia.

Notas y referencias

¹ Este ensayo está basado en una conferencia pública ofrecida con motivo de la exposición *Einstein la Exhibición* en el Parque Explora (Medellín, Colombia). La presentación, el audio de la conferencia completa y una versión editada en video están disponibles para descarga en: <http://urania.udea.edu.co/sitios/jzuluaga/conferencias.php>. Acceso: 18 de septiembre de 2011.

² Es curioso pero, técnicamente, en la relatividad son más importantes las cosas “absolutas” que las relativas. Einstein mismo y muchos contemporáneos suyos se vieron tentados en algún momento a llamar a la nueva creación “teoría de la invariancia” porque el nombre “relatividad” sonaba diferente del propósito fundamental de la teoría y conducía a algunas malinterpretaciones en otros ámbitos como la ética, la política o la religión. Para otros detalles biográficos de Einstein y la teoría de la relatividad ver Abraham Pais, *Subtle is the Lord... The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, 1982.

³ Ciertamente la dirección temporal es diferente de las otras tres direcciones porque sólo permite desplazarse en un sentido, hacia el futuro. Este hecho es fundamental en la física y está directamente relacionado con otros principios fundamentales como el principio de causalidad o con leyes como la segunda ley de la termodinámica. El universo tiene cuatro dimensiones pero no es “isotrópico”, es decir, hay una dirección que es diferente de las demás.

⁴ Hay que precisar que las fórmulas presentadas aquí son sólo esquemáticas y no rigurosas. Hemos querido evitar el uso de una simbología matemática muy elaborada para no perder de vista los elementos fundamentales de la argumentación. Una versión más precisa de la fórmula es $ds^2 = (cdt)^2 - (dr)^2$, donde ds es la cuadrilongitud, c es la velocidad de la luz, dt es la duración y dr es la distancia espacial. A esta fórmula se la conoce históricamente como la “métrica de Minkowski” en honor al matemático alemán Herman Minkowski que compiló los resultados de Poincaré y Einstein.

⁵ Técnicamente, a este resultado se lo conoce en la teoría de la relatividad como el “Postulado de los relojes”. Ver Lorenzo de la Torre. *Elementos de relatividad*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

⁶ Se le llama “dilatación” porque los relojes del circo marcan duraciones que son compartidas por muchos observadores. Se le da más importancia, por tanto, al hecho de que el tiempo de los relojes en reposo en el circo sea mayor (dilatado) respecto al tiempo del reloj de Chaplin.

⁷ Técnicamente a este resultado se lo conoce como “principio de envejecimiento máximo”, y al camino más largo se lo denomina “geodésica espacio-temporal”. Ver Lorenzo de la Torre. *Elementos de relatividad*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.

⁸ Isaac Newton, *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Una excelente traducción es publicada en la colección “Grandes Obras del Pensamiento” de la editorial Altaya, 1993.

⁹ La más conocida, pero no la única, es el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio. Venus y la Tierra tienen movimientos anómalos similares, y otros efectos no explicables únicamente con la teoría de la gravedad newtoniana han sido observados en el movimiento de vehículos espaciales. Ver James B. Hartle, “Gravity, An Introduction to Einstein's General Relativity”. San Francisco: Addison-Wesley, 2003.

¹⁰ Alonso Sepúlveda. *Historia de la física, desde los griegos hasta nuestros días*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 1995.

¹¹ El video grabado del experimento de la pluma y el martillo durante la misión tripulada a la Luna Apollo 15 (1971) puede encontrarse en: <http://video.google.com/videoplay?docid=6926891572259784994>. En línea: 19 de septiembre de 2011.

¹² Hay que precisar que un cuerpo en caída podría él mismo alterar la geometría del espacio-tiempo a su alrededor. En realidad, los cuerpos se mueven en un espacio-tiempo distorsionado por el cuerpo principal (la Tierra, por ejemplo) y por ellos mismos. Sin embargo, si consideramos experimentos con objetos muy pequeños comparados con la Tierra o la Luna, como la pluma y el martillo, es posible suponer que la distorsión espacio-temporal es sólo producida por la Tierra.

¹³ Puede encontrarse una ilustrativa explicación de cómo se construye un motor eléctrico con elementos de la vida cotidiana en este video disponible públicamente en la web: http://www.youtube.com/watch?v=it_Z7NdKgmY. En línea: 19 de septiembre de 2011.