

## Teoría de la relatividad

J. Javier Zubiri<sup>.\*</sup>

Días atrás hemos tenido entre nosotros al profesor *Alberto Einstein*, cuyas ideas expuso en diversas conferencias en la Universidad Central; séanos permitido vulgarizar algunas de las principales de ellas para los lectores de esta Revista.

El nombre de Einstein es símbolo de una de las mayores conquistas de la Física teórica: la eliminación de las fuerzas que actúan a distancia, mediante la *generalización* del principio de relatividad y *su interpretación* geométrica. Y dije generalización porque ese principio no es de invención moderna: fue ya científicamente formulado por *Galileo y Newton*.

Los movimientos rectilíneos y uniformes son fenómenos de *pura relación* entre dos móviles, relación que queda *inalterada* cualquiera que sea el móvil a que se atribuya el movimiento. Dicho en términos matemáticos: *Las ecuaciones de la mecánica son invariantes para los sistemas de coordenadas en movimiento rectilíneo y uniforme*. La consecuencia inmediata de este *principio clásico de relatividad*, es que con sólo el estudio de esta clase de movimientos el viajero no podrá averiguar jamás cuál de los dos se mueve *en realidad*: si el tren o el paisaje. Este ejemplo no es mera sutileza científica: encuentra su plena realización en el movimiento que podemos considerar uniforme respecto del cielo de las estrellas fijas. Según el principio de Galileo, si un físico no estudia más que este fenómeno, no llegará jamás a demostrar el movimiento absoluto de la Tierra.

Pero evidentemente puede echar mano de otra clase de experiencias, tales como la propagación de la luz. Según la *teoría electrónica de Lorentz*, el éter está en el espacio en *reposo absoluto*, y relativamente a él, se propaga la luz con una velocidad uniforme de 300.000 kilómetros por segundo. Por su parte la Tierra tiene un movimiento de traslación uniforme de velocidad  $V$  que vamos a calcular. Durante la primavera la Tierra va aproximándose al Sol y por tanto camina en dirección opuesta a la de la luz procedente de éste. Según el principio de Galileo podemos suponer que la Tierra está inmóvil y entonces la velocidad de la luz *relativamente* a la tierra, sería  $C' = C+V$  <sup>(a)</sup>. En otoño la Tierra se va alejando del Sol y va por tanto en la misma dirección que los rayos solares. Luego la velocidad de éstos relativamente a la Tierra sería  $C'' = C-V$ . Si hubiera algún aparato que permitiera medir  $C'$  y  $C''$ , por

un sencillo cálculo obtendríamos el valor de  $V$ ; ésta sería la velocidad *absoluta* de la Tierra. *Michelson* y *Morley* construyeron un aparato llamado *Interferómetro* que registra la menor variación de la velocidad de la luz, en forma de interferencias. Pues bien; repetido el experimento en todas las formas posibles se ha llegado siempre a un *resultado negativo*; *la velocidad de la luz relativamente a la Tierra es constante*.

Ante tan extraña conclusión, *Einstein*, tiene la idea de cambiar radicalmente de punto de vista. Admite, pues, sin reservas, el *hecho* de la constancia de la velocidad de la luz, que traducido en términos matemáticos dice: “*Todas las leyes de la naturaleza, ópticas y mecánicas, son invariantes para sistemas en movimiento rectilíneo y uniforme*”. La teoría trata de explicar *cómo* es posible el hecho de esta invariabilidad; para ello ha tenido que romper con inveterados hábitos de pensamiento. Todos comprendemos que una hora puede *parecernos* más larga que otra, pero nos resistimos a creer que *en realidad* unas horas sean más largas que otras. Para *Einstein* en cambio, en los sistemas en movimiento el tiempo no sólo *parece*, sino *es* más lento que en los sistemas en reposo; el espacio por el contrario *es* más largo (valga la expresión) en los sistemas en reposo que en los que se mueven. Y gracias a esta variación inversa del tiempo y del espacio permanece invariante la experiencia, la cual jamás nos muestra espacio puro ni tiempo puro, sino el *compuesto espacio-tiempo*. Y puesto que las medidas del espacio son función del tiempo, resulta matemáticamente *cómodo* considerar a éste como una *cuarta dimensión* de aquél (*Minkowski*). Si la humanidad no ha notado estas variaciones de los metros y de los relojes, se debe a que son tan sumamente pequeñas que en una mecánica terrestre resultan prácticamente nulas. Y éste es un mérito de *Einstein*: el haber conservado la *mecánica de Newton* como una *primera aproximación*.

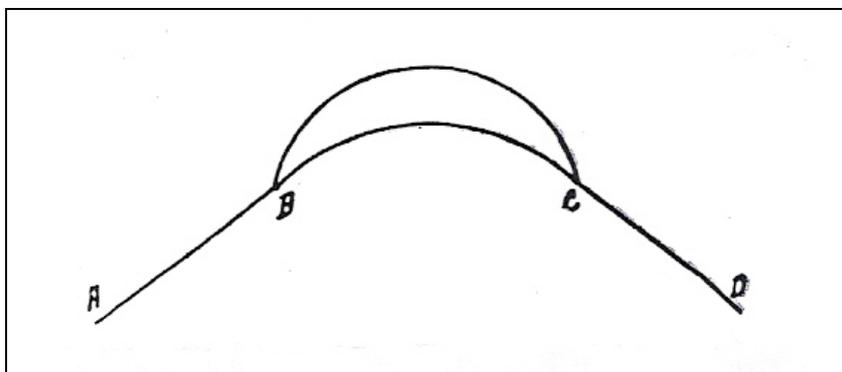
A pesar de esta ampliación, queda aún una importantísima categoría de hechos que escapan al principio de relatividad tal como ha sido formulado hasta ahora: los *movimientos acelerados*. Las *fuerzas de inercia* manifestadas en las aceleraciones serían una *prueba del movimiento absoluto*. *Newton*, excluye, pues, a esta clase de movimientos, del principio de relatividad.

*Einstein*, en cambio, no duda en afirmar el carácter esencialmente relativo de las aceleraciones, y por tanto de los campos de fuerzas. Las aceleraciones y las fuerzas de inercia no escapan a la ley de relatividad. Ahora bien; un hecho conocido de antiguo nos enseña que la *masa inerte* y la *masa gravitatoria* son *equivalentes*. Si a un cuerpo cualquiera comunico una fuerza  $F$ , el cuerpo adquiere una aceleración  $B$ ; el cociente de la fuerza por la aceleración es una constante para cada cuerpo llamada *masa inerte*. Si dejo caer un cuerpo toma éste una aceleración determinada; el cociente de la fuerza de gravitación por las aceleraciones de la caída es una constante llamada *masa gravitatoria*. La experiencia enseña que ambas masas son idénticas. De este hecho deduce *Einstein* que gravitación e inercia son dos fenómenos de idéntica naturaleza. Luego el principio de relatividad de las fuerzas de inercia, debe, para ser ver-

dadero, poder explicar las acciones de la gravitación, como fenómenos de pura relación. ¿Cómo es esto posible?

Consideremos un hombre en el polo Norte con un objeto en sus manos; lo suelta y el objeto naturalmente, cae. Newton supone que la Tierra permanece inmóvil y que *atrae* al cuerpo. Einstein recuerda que sería indiferente suponer que la Tierra se mueve en dirección ascensional, permaneciendo inmóvil el objeto. Si nos limitamos, pues, a un trozo de espacio la cuestión no ofrece gran dificultad. La dificultad estriba en que la hipótesis del movimiento ascensional de la Tierra no explica más que una parte del campo de gravitación: los habitantes del polo Sur ven también caer los objetos al suelo *al mismo tiempo* que los del polo Norte; ¿supondríamos entonces que la Tierra asciende y desciende simultáneamente? Hay que buscar, pues, otra explicación. Y aquí es donde entra todo el complicadísimo desarrollo matemático en el que han colaborado sabios de diversas nacionalidades. Me limitaré a dar una *vaga* idea de lo que es un *campo de gravitación* para Einstein.

Supongamos un proyectil que procede de las más lejanas estrellas, *A*. En virtud de su inercia seguirá una trayectoria rectilínea *AB*. Pero al llegar a regiones donde alcanza el campo de gravitación del Sol su trayectoria se desvía de la línea recta para hacerse curva. El movimiento de inercia es rectilíneo; el de gravitación, curvilíneo. *Newton* cree que la desviación se debe a la acción atractiva de la masa del sol que se halla distante.



*Einstein* cambia de punto de vista. Fuera del campo de gravitación el espacio es *euclideo*, y por tanto un cuerpo abandonado a sí mismo sigue una trayectoria rectilínea: tal es la *inercia clásica*. Pero en un campo de gravitación el espacio, según Einstein, no es euclideo sino *riemanniano*. Quiere esto decir que es un espacio en el cual no existen más que líneas curvas, no porque haya en él fuerzas que desvíen los cuerpos, sino porque el espacio *es en sí mismo curvilíneo*, al igual que el euclideo es rectilíneo. Así, un disco abandonado a su propio movimiento sobre la superficie de la

abandonado a su propio movimiento sobre la superficie de la Tierra, no describe jamás líneas rectas sino arcos de elipse a causa de la esfericidad de la Tierra. Por la *curvatura* del espacio, un cuerpo abandonado a sí mismo en un espacio riemanniano sigue *trayectoria curvilínea en virtud de su inercia*. Esta inercia en un espacio de Riemann produce, pues, los mismos efectos que la atracción de Newton en un espacio euclideo. Podemos entonces sustituir el segundo por el primero; y esta sustitución tiene la ventaja de comprender en una sola *ley de inercia generalizada* los fenómenos de inercia clásica y de gravitación. *La gravitación no es una fuerza de atracción sino la curvatura del espacio*. En las inmediaciones del Sol la gravitación, y por tanto la curvatura del espacio, es muy pronunciada; va debilitándose a medida que nos alejamos del Sol, hasta que en el caso límite, en el infinito, en ausencia de toda masa material, la gravitación se anula y el espacio tiene curvatura cero; es decir sería euclideo. La inercia clásica no es más que un caso particular, el caso límite de la gravitación. Y viceversa; la gravitación es una inercia en un espacio de curvatura mayor que cero, variable en función de la densidad de la materia y de la posición; es una fuerza que actúa por contacto y no a distancia. Consecuencia de esto es, que ningún cuerpo ni ningún rayo de luz se propaga en línea recta. Esta consecuencia ha sido experimentalmente comprobada en un célebre eclipse de Sol que mostró la desviación que sufren los rayos luminosos al pasar cerca del Sol; esta desviación, es, en virtud de la equivalencia entre inercia y gravitación, el *peso de la luz*. Pero nosotros no nos damos cuenta de esta forma retorcida que tiene un rayo luminoso porque nuestros relojes y nuestros metros materiales (incluso nuestros sentidos) sufren la misma deformación. Por consiguiente nosotros no podemos percibir jamás velocidades ni formas absolutas sino solamente *diferencias* entre velocidades y tamaños, esto es, puras relaciones, las cuales gracias a las variaciones recíprocas y contrarias del tiempo y del espacio permanecen invariantes en cualquiera transformación. Así se llega al *principio de relatividad universal*: “*Todas las leyes de la naturaleza son invariantes para cualquier sistema de coordenadas*”.

Tal es a grandes rasgos la obra del genial científico. Solamente queda un problema por resolver: la *relación entre el campo de gravitación y el electromagnético*. Tratar de reducirlos a una fórmula única es el problema, candente aún, de la ciencia, al que sabios continuadores de la obra del maestro, *Weyl* y *Eddington*, consagran titánicos esfuerzos, desgraciadamente aún no coronados por éxito indiscutible.

#### NOTAS

\* N. E.: Así firmaba en sus primeros tiempos el que finalmente firmaría “Xavier Zubiri”.

(<sup>a</sup>) El carácter de esta publicación me autoriza a ciertas inexactitudes.