

Apéndice I

“Muy a menudo, sin embargo, resulta imposible remendar una teoría vieja, y las dificultades la llevan a su ocaso y provocan el nacimiento de una nueva teoría ...”

A. Einstein, L Infeld. *“La Física, Aventura del Pensamiento”*

LA PUBLICACIÓN DE EINSTEIN DE 1905

El trabajo de Einstein de 1905¹ (*“Sobre la Electrodinámica de los Cuerpos en Movimiento”*), es la presentación “oficial” de la Teoría de la Relatividad. La función de este apéndice es la de estimular al lector a recorrer y analizar este trabajo para recibir, en forma directa, las interpretaciones de Einstein al momento de presentar su monumental teoría.

Si bien el trabajo original presentando una nueva teoría científica suele ser arduo de leer para un no especialista, en este tipo de publicaciones hay ciertos detalles y comentarios muy significativos que suelen perderse en las posteriores obras de divulgación, cuando la teoría ya es aceptada por la comunidad científica.

Conforme a las discusiones presentadas en el capítulo XI, en el proceso de descartar una teoría para desarrollar una nueva, el científico sufre una especie de crisis y proceso creativo, donde es plenamente consciente de las limitaciones de la antigua teoría y de las suposiciones y cambios que son necesarios para adoptar el nuevo punto de vista. Parte de ese “parto” creativo se manifiesta, inevitablemente, en el trabajo o publicación pionera.

Más adelante, cuando la teoría es aceptada, ya no es necesario resaltar los análisis y suposiciones que condujeron a ella. Los textos de divulgación se centran en las aplicaciones, más que en los fundamentos de las teorías aceptadas. O, cuando presentan los fundamentos, lo hacen en forma didáctica y no histórica, de modo que suele perderse el entorno original. Por esta razón no hay forma de sustituir el texto original si es que se quiere captar algo del proceso creativo que dio lugar a la nueva teoría.

En el caso particular de la Teoría de la Relatividad Especial, pese a su increíble influencia posterior en el ámbito científico y tecnológico, el trabajo original no es muy extenso y puede leerse sin necesidad de poseer conocimientos elevados de matemáticas.

En este apéndice sólo analizo los párrafos del trabajo original de Einstein, que son los más relevantes para los análisis presentados en este libro. Los que deseen ver el texto completo, en Inglés, pueden encontrarlo en <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>, o en el libro **The Principle of Relativity** (*a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity*) de DOVER Publications INC.

PÁRRAFOS ESCOGIDOS

Sobre el Éter

En la introducción de su trabajo, Einstein incluye el siguiente párrafo:

“... Ejemplos de esta clase, junto con los infructuosos intentos de poner de manifiesto el movimiento de la Tierra, con respecto al “medio luminoso”, sugieren que el fenómeno de la electrodinámica, del mismo modo que la mecánica, no posee propiedades que se correspondan con la idea de un reposo absoluto. Ellos sugieren, por el contrario, como ya fue mostrado hasta el primer orden de cantidades pequeñas, que las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica son válidas en todos los sistemas de referencia en los cuales las leyes de la mecánica funcionan bien. Nosotros elevaremos esta conjetura (a cuyo significado haremos referencia como “Principio de Relatividad”) al “status” de Postulado y también introduciremos un segundo postulado que es sólo aparentemente irreconciliable con el primero. Este segundo postulado establece que la luz siempre se propaga en el espacio vacío a una velocidad constante “c” que es independiente de la velocidad del objeto emisor. Estos dos postulados son suficientes para desarrollar una teoría simple y consistente para la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, basada en la teoría de Maxwell para cuerpos estacionarios. La introducción de un “éter luminífero” probará ser superflua en tanto que el punto de vista aquí desarrollado no requiere de un “espacio estacionario absoluto” provisto de propiedades especiales...”

Pero..., independientemente de esta introducción, más adelante incluye las siguientes expresiones.

“... Con el fin de hacer nuestra presentación más precisa y para distinguir verbalmente este sistema de coordenadas de los que introduciremos después, llamaremos a éste “sistema estacionario”...”

“... Es esencial que el tiempo esté definido por medio de relojes estacionarios en el sistema estacionario. El tiempo así definido resulta apropiado para el sistema estacionario y lo llamaremos “El tiempo en el sistema estacionario...”

“...Tomemos dos sistemas de co-ordenadas en un espacio ‘estacionario’...”

Y muchas otras, donde el desarrollo se hace planteando la existencia de un espacio estacionario. Esto no demuestra que el espacio estacionario realmente existe. Pero sí demuestra que las ecuaciones de la Relatividad Especial se obtienen en un entorno compatible con dicho espacio estacionario, o con el concepto de **MRLE** introducido en este libro.

La Raíz del Problema

El siguiente párrafo es una muestra genuina de la genialidad de Einstein:

“... La teoría a desarrollar se basa -como toda la electrodinámica- en la cinemática del cuerpo rígido dado que las afirmaciones de tales teorías están vinculadas a las relaciones entre cuerpos rígidos (sistemas de coordenadas), relojes y procesos electromagnéticos. La raíz de las dificultades que encuentra, en el presente, la electrodinámica de los cuerpos en movimiento yace en una insuficiente consideración de estas circunstancias...”

Dicho párrafo es un resumen brillante del enfoque de Einstein para “atacar” el problema que enfrentaba la física en su época.

La Solución

Una vez definido el problema, el análisis prosigue identificando las etapas claves en la interacción entre sistemas móviles: la simultaneidad y el sincronismo. Los siguientes son algunos párrafos clave del desarrollo de Einstein:

“... Sin embargo, debemos ser extremadamente cautos, aceptando que una descripción matemática de este tipo carece de significado físico, excepto que tengamos muy en claro qué es lo que entendemos por “tiempo”. Debemos tomar en consideración que todos nuestros juicios en los que el tiempo forma parte, son siempre juicios de eventos simultáneos. Si, por ejemplo, yo digo, “ese tren llega aquí a las 7 en punto (7:00:00)” en realidad estoy expresando algo así como “La indicación de las agujas de mi reloj, señalando las 7 en punto y la llegada del tren, son eventos simultáneos...”.

*“... Pero no es posible, sin hacer suposiciones adicionales, comparar con respecto a tiempo, un evento de **A** con un evento de **B**. Hasta ahora sólo hemos definido un tiempo de **A** y un tiempo de **B**. No hemos definido un tiempo en común para **A** y **B**, puesto que esto último no puede ser hecho excepto que establezcamos por definición que el tiempo que tarda la luz en recorrer el camino de **A** hasta **B**, es el mismo que tarda en recorrer el camino de **B** hasta **A**...”.*

Este último punto es crucial en el desarrollo de la Relatividad Especial. Es muy importante tener en claro lo que significa aceptar por definición, que el tiempo empleado en el camino de ida es igual al tiempo empleado en el retorno. En realidad Einstein era consciente de que ya se habían agotado los esfuerzos para hacer la medición y que los resultados indicaban claramente que la respuesta era la que él “postuló”.

“... De esta forma, con la ayuda de un experimento imaginario hemos podido establecer qué es lo que se entiende por relojes estacionarios sincronizados ubicados en diferentes lugares y hemos obtenido evidentemente, una definición de “simultáneo” o “sincrónico” y de “tiempo”. El “tiempo de un evento es aquel que es dado simultáneamente con el evento por un reloj ubicado en el lugar del evento. Este reloj debe ser sincrónico con un determinado reloj estacionario...”.

“... De este modo vemos que no es posible asignar un significado absoluto al concepto de simultaneidad. Dos eventos que pueden parecer simultáneos, vistos desde un sistema de co-ordenadas, pueden resultar como no simultáneos cuando se aprecian desde un sistema de co-ordenadas en movimiento relativo con respecto al primero...”.

Los Postulados de la Relatividad

Los postulados que dan origen a la Relatividad Especial, fueron presentados en los siguientes términos:

“... Las leyes que describen los cambios de los sistemas físicos no resul-

tan afectadas si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas en traslación con movimiento uniforme.

Cualquier rayo de luz se mueve en el sistema estacionario con velocidad “c” tanto si el rayo es emitido desde un cuerpo en movimiento como si es emitido desde el sistema estacionario....”.

La Adición de Velocidades

En el siguiente párrafo se presenta un ejemplo que suele confundir al lector desprevenido:

*“... Supongamos, entonces, que un rayo de luz parte de **A** al tiempo **tA**, se refleja en **B**, al tiempo **tB** y alcanza nuevamente la posición **A** al tiempo **t'A**. Tomando en consideración el principio de constancia de la velocidad de la luz, encontramos que:*

rAB

$$tB-tA = \text{-----}$$

c - v

y

rAB

$$t'A-tB = \text{-----}$$

c + v

*donde **rAB** hace referencia a la longitud de la varilla medida en el sistema estacionario. De acuerdo con estas fórmulas, los observadores móviles (que se trasladan con la varilla) encontrarán que sus relojes no son sincrónicos, mientras que los observadores estacionarios declararán que son sincrónicos...”.*

En esta deducción, como en todas las asociadas a la Relatividad Especial, Einstein emplea la adición clásica de velocidades. Le agrega y le resta a “c” el valor de la velocidad “v” del sistema móvil, en total concordancia con asumir un medio en reposo y una velocidad de propagación de la luz constante en ese medio en reposo. Sus desarrollos matemáticos, como en este caso, parten de asumir que la velocidad de la luz es diferente en recorridos de Ida o de Vuelta, en el sistema móvil, cuando se aprecian desde el sistema que se considere a sí mismo como estacionario.

Nota: *Algunas personas que no han profundizado en los desarrollos relativistas, creen que es incorrecto escribir expresiones tales como (c+v) o (c-v) pues dan la sensación que es posible viajar a velocidades mayores que “c”. Sin embargo, estas expresiones son perfectamente válidas para describir las cosas tal como las ve un observador inercial.*

Supongamos que este observador envía una señal luminosa (naturalmente con velocidad “c”) hacia su izquierda mientras otro observador se mueve hacia su derecha, a velocidad 0.5 c. Desde el punto de vista del primer observador, el rayo de luz se aleja a 1.5 c del segundo observador. Lo que

“exige” la Relatividad Especial, basándose en la constancia de “c” es que el rayo de luz se aleje a velocidad “c” del segundo observador cuando es este último el que hace la medición.

Las Aceleraciones

Contrariamente a lo que sostienen muchos de los que aceptan la interpretación actual de la Relatividad Especial, Einstein no tuvo inconvenientes en analizar sistemas acelerados con esta Teoría. El siguiente texto es muy ilustrativo:

*“... Tomemos dos sistemas de co-ordenadas en un espacio “estacionario”, o sea, dos sistemas de tres líneas materiales rígidas, perpendiculares entre sí y que concurren en un punto. Tomemos los sistemas de modo que los ejes **X** de ambos sistemas sean coincidentes y que los ejes **Y** y **Z** sean respectivamente paralelos. Consideremos que cada sistema dispone de una varilla rígida de medición y un número suficiente de relojes, y que tanto las varillas como todos los relojes son idénticos.*

*Ahora supongamos que al origen de uno de los dos sistemas (**k**) se le imprime una velocidad **v** en la dirección de las **x** crecientes del otro sistema de co-ordenadas (**K**), y que tanto los ejes como la varilla y los relojes del sistema **k** toman la velocidad **v**...”.*

Es remarcable que Einstein parte de un sistema en reposo y lo acelera hasta que adquiere una velocidad **v**. Como se vio en diferentes capítulos de este libro, esta operación es perfectamente válida para estudiar los fenómenos relativistas, pero es necesario admitir la existencia de **MRLE** para evitar situaciones paradójicas.

La Paradoja de los Gemelos

Einstein introdujo la famosa paradoja, como consecuencia de su propia teoría. La versión presentada por Einstein fue la siguiente:

*“...A partir de esto se obtiene la siguiente llamativa consecuencia. Si en los puntos **A** y **B** del sistema rígido **K** hay relojes estacionarios que son sincrónicos de acuerdo con las observaciones realizadas en el mismo sistema estacionario **K**, y si el reloj de **A** se mueve con la velocidad **v** hacia **B**, entonces, a su arribo a **B** los dos relojes dejarán de ser sincrónicos. El reloj trasladado desde **A** hasta **B** atrasará con respecto al reloj que permaneció estacionario en **B** de acuerdo con la magnitud $\frac{1}{2} tv^2/c^2$ siendo **t** el tiempo involucrado en el traslado.*

*Parece razonable que este resultado es igualmente válido si el traslado de **A** hacia **B** procede a través de una poligonal, e incluso si los puntos **A** y **B** son coincidentes (salida desde **A**, recorrido de una poligonal y retorno al mismo punto).*

*Si asumimos que el resultado probado para una poligonal es también válido para una línea curva continua, obtenemos el siguiente resultado: Si uno de los dos relojes sincrónicos de **A** se mueve en una curva cerrada con velocidad constante hasta que retorna a **A**, y el viaje consume **t** segundos, de acuerdo con las indicaciones del reloj que permaneció en reposo, el reloj*

viajero atrasará $\frac{1}{2} tv^2/c^2$ en el momento de su retorno al punto de partida.

De esta forma concluimos que un reloj en el Ecuador debe marchar más lentamente (por una muy pequeña cantidad) que un reloj similar situado en un polo, si todo el resto de las condiciones son idénticas.....”

Una variante de esta experiencia, confirmada innumerables veces con los relojes satelitales, es la que conduce a paradojas en la interpretación ortodoxa de la Relatividad Especial si se comparan dos relojes en órbitas idénticas pero en giros opuestos (Por ejemplo: Este-Oeste y Oeste-Este). El tema se analiza en el Capítulo VII.

OTROS TEMAS

La publicación de 1905 incluye desarrollos adecuados analizando la composición de velocidades, el efecto Doppler, la aberración de la luz y otros temas, desde el punto de vista relativista. La relación entre masa y energía no se incluye en este trabajo, publicado en junio de 1905, sino en uno posterior, publicado en septiembre de 1905.

AÑOS MÁS TARDE

Einstein dejó numerosos escritos posteriores donde comenta algunos de los puntos presentados en su publicación de 1905.

Creo que es de particular importancia analizar algún comentario realizado cuando ya era un físico reconocido mundialmente y la Teoría de la Relatividad se había constituido en uno de los pilares de la física moderna.

En un escrito relacionado a la Universidad de Leyden, en 1920, argumenta de la siguiente forma para justificar la equivalencia de todos los sistemas inerciales:

*“... Siendo **K** un sistema de coordenadas con respecto al que el éter de Lorentz está en reposo, las ecuaciones del Maxwell-Lorentz son válidas en primer lugar con referencia a **K**. Pero, en virtud de la teoría especial de la relatividad, las mismas ecuaciones, sin ningún cambio de significado, también son adecuadas para cualquier nuevo sistema de coordenadas **K'** que se esté moviendo con traslación uniforme respecto a **K**. Ahora surge la pregunta principal: ¿Por qué debemos distinguir, en la teoría, el sistema **K** de todos los otros sistemas **K'**, que son físicamente equivalentes a **K** en todos los aspectos, asumiendo que el éter está en reposo respecto al sistema **K**? Para el teórico tal asimetría en la estructura teórica, sin asimetría correspondiente en las experiencias, es intolerable. Si asumimos que el éter está en reposo relativo respecto a **K**, pero en movimiento relativo con respecto a **K'**, la equivalencia física de **K** y de **K'** me parece, desde el punto de vista lógico, no directamente incorrecto, pero sin embargo inaceptable.”*

Puede comprobarse que en cualquier rama de la ciencia, excepto en Relatividad Especial, este argumento estaría viciado en su propia lógica.

Si se asume una premisa como verdadera y se llega a un resultado absurdo, es razonable descartar la premisa. Así funcionan las muy elegantes demostraciones

por el absurdo tales como la irracionalidad de la raíz cuadrada de 2. Yo mismo he recurrido a este tipo de demostraciones en algunos de mis argumentos.

Pero Einstein descarta la premisa inicial no porque conduce a un absurdo, sino... ¡porque conduce a unas matemáticas que describen maravillosamente bien el comportamiento del mundo físico!

Prueba de que no puede descartarse la premisa inicial son algunos párrafos adicionales del propio Einstein, tomados del mismo escrito de 1920:

“Sin embargo, reflexiones más cuidadosas nos enseñan que la teoría de la relatividad especial no nos obliga a negar el éter”

...

“La teoría especial de la relatividad nos prohíbe asumir que el éter esté formado por partículas observables a lo largo del tiempo, pero la hipótesis del éter en si misma no entra en conflicto con la relatividad especial.”

...

“Pero, por otra parte, existe un argumento de peso para presentar a favor de la hipótesis del éter. Negar el éter nos obliga a asumir, en última instancia, que el espacio vacío no posee propiedades. Los hechos fundamentales de la mecánica no armonizan con este enfoque dado que el comportamiento mecánico de un sistema corpóreo dejado en libertad en el espacio vacío depende no sólo de de las posiciones relativas (distancias) y velocidades relativas, sino también de su estado de rotación, que físicamente puede ser considerado como no perteneciente al propio sistema.”

...

“Recapitulando, podemos decir que, de acuerdo con la teoría general de la relatividad al espacio deben asignársele algunas cualidades; en este sentido, por lo tanto, existe un éter. De acuerdo con la teoría general de la relatividad el espacio sin éter es impensable...”

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Como podrán apreciar quienes decidan leerlo, el trabajo de Einstein de 1905 presenta manejos matemáticos muy sencillos. Lo principal de sus desarrollos son los conceptos y suposiciones que lo llevan a plantear las ecuaciones de transformación de coordenadas entre sistemas con movimiento relativo.

Tal como mencioné al comienzo de este apéndice, considero que la lectura completa de este trabajo es un buen ejercicio para entender, sin recurrir a intérpretes intermediarios, el planteo original de Einstein.