

INTRODUCCIÓN

LAS APORTACIONES DE EINSTEIN

En 1970, Einstein publicó un pequeño libro con la intención de «dar una idea lo más exacta posible de la teoría de la relatividad, pensando en aquellos que, sin dominar el aparato matemático de la física teórica, tienen interés en la teoría desde el punto de vista científico o filosófico general». Tituló este libro *sobre la teoría de la relatividad especial y general (Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie: Gemeinverständlich)*, y una parte abreviada del mismo se publica aquí como prólogo de esta edición, completada con un texto de enjuiciamiento: *El significado de relatividad (The meaning of relativity)*, que recoge las cuatro conferencias que Einstein impartió en Princeton en 1921, fecha de su primer viaje a Estados Unidos.

Los años de publicación de estos textos son, pues, fundamentales. La teoría de la relatividad, especial y general, se hallaba formulada y sus efectos revolucionarios sobre la ciencia del siglo XX – por no hablar del pensamiento contemporáneo – comenzaban a operarse. La concesión a Einstein en 1921 del Premio Nobel de Física fue un reconocimiento de la importancia crucial de estos descubrimientos en el campo de la física teórica, descubrimientos que habían empezado veinte años atrás, cuando Einstein era un modesto funcionario de la oficina de Patentes de Berna.

Uno de los puntos de partida de Einstein fue el rechazo de la hipótesis del éter, que había sido puesta en vigor por el físico francés Augustin Fresnel (1788–1827). Este fluido imponderable, elástico, en el que, al parecer, se propagaban las ondas luminosas, no había podido ser probado experimentalmente.

Einstein amplió los fundamentos de su teoría de la relatividad especial al campo gravitacional. Le fueron útiles para esta generalización las aportaciones de varios científicos. De James C. Maxwell (1831–1879), incorporó su teoría de los campos electromagnéticos (sin base de un tiempo y un espacio absolutos); el concepto del campo, que tenía por precursores a Heinrich Hertz (1857–1894) y a Hendrik A. Lorentz (1853–1928), le resultó enormemente operativo desde el momento en el que él expresaba una realidad físico-geométrica independiente del movimiento del observador; finalmente, adoptó la teoría del espacio-tiempo, pseudoeuclídeo, del matemático ruso Hermann Minkowsky (1864–1909), incorporándole la noción de curvatura que había introducido el matemático alemán Bernhard Riemann (1826–1866).

Partiendo de estos presupuestos, Einstein estableció su teoría de la relatividad general. Cuando un cuerpo está en libertad queda fuera de la acción de toda fuerza y su forma de movimiento expresa únicamente propiedades del espacio-tiempo en los lugares por donde pasa. Contrariamente a las leyes de la física clásica, la geometría del universo no es euclídea, es una geometría de cuatro dimensiones – una geometría en el espacio y en el tiempo – que delimita un universo cerrado y finito (el espacio se curva en la proximidad de los cuerpos con masa).

La teoría de la relatividad especial y general de Einstein transformó las nociones de distancia y de duración. Junto a la teoría cuántica de Max Planck (1858–1947), la teoría del átomo de Niels Bohr (1885–1962) y la nueva teoría cuántica de 1925, obligó a la física a rehacer por entero los fundamentos sobre los que se asentaba.

EL SIGNIFICADO DE LA RELATIVIDAD

El espacio y el tiempo en la física prerrelativista

La teoría de la relatividad se halla íntimamente vinculada a la teoría del espacio y del tiempo, razón por la cual comenzaré exponiendo un breve análisis del origen de nuestras ideas referentes al espacio y al tiempo. El

objeto de toda ciencia, sea natural o psicológica, consiste en coordinar nuestras experiencias de modo que el todo forme un sistema lógico. Cabe entonces preguntarse: ¿Cuál es la relación entre nuestras ideas habituales de espacio y tiempo y el carácter de nuestras experiencias?

Las experiencias de cada uno de nosotros, en cuanto individuos, se nos presentan como una ordenación de una serie de acontecimientos en la cual los sucesos aislados que recordamos aparecen ordenados de acuerdo con el criterio de «posterior», el cual no es susceptible de análisis ulterior. Por lo tanto, existe para un dado individuo un tiempo del yo, o tiempo subjetivo, el cual no es mensurable en sí mismo. En realidad, es posible asignar un número a cada acontecimiento de modo que al último le corresponda un número mayor que a uno anterior cualquiera, pero la manera de proceder a esta asignación de números puede ser completamente arbitraria. Puedo definir esta correspondencia entre números y sucesos comparando el orden de éstos, determinado por el reloj, con el orden de la serie dada de acontecimientos. Con la palabra reloj queremos significar algo donde se produce una serie de sucesos que pueden contarse y que posee, además, otras propiedades a las que nos referimos más adelante.

Distintos individuos son capaces, mediante el uso del lenguaje, de comparar entre sí, en cierta medida, sus experiencias. De este modo se demuestra que ciertas percepciones sensoriales de distintas personas se corresponden entre sí, mientras que dicha correspondencia no se presenta en el caso de otras percepciones sensorias. Tenemos la costumbre de considerar como reales las percepciones sensorias que son comunes a diferentes individuos y que tienen, por lo tanto, en cierta medida, un carácter personal. Las ciencias naturales, y en particular la fundamental entre ellas, esto es la Física, tiene por objeto el estudio de dichas percepciones sensorias impersonales. Un reloj es un cuerpo o un sistema y este aspecto es también individual, pero posee por añadidura la propiedad de que todos los elementos de la serie de acontecimientos que cuenta, puede ser considerados como iguales entre sí.

La única justificación de nuestros conceptos y sistema de conceptos reside en el hecho de que son útiles para representar el complejo de nuestras experiencias; pero fuera de ello no posee otro título de legitimidad. Estoy convencido de que ha sido perjudicial la consecuencia que ha tenido en el progreso del pensamiento científico, el empeño de los filósofos de sacar fuera del dominio del empirismo ciertos conceptos fundamentales, trasladándolos así de este dominio, que está bajo nuestro control, a las alturas intangibles de lo apriorístico. Admitiendo que el universo de ideas no puede ser deducido de la experiencia por un método lógico sino que, por el contrario, es una creación de la mente humana, sin la cual no es posible la Ciencia, aun así resulta que este universo de ideas es tan dependiente de la naturaleza de nuestras experiencias como la forma de los vestidos que usamos es dependiente de la forma de nuestros cuerpos. Esto es particularmente aplicable a nuestros conceptos de tiempo y espacio, a los cuales los físicos se han visto obligados, por los hechos, a hacerles descender del Olimpo de *a priori*, con el objeto de modificarlos de modo que puedan prestar servicios útiles.

Consideramos ahora nuestros conceptos y juicios referentes al espacio. Es de esencial importancia en esto prestar una atención extremada a la relación entre la experiencia y nuestros conceptos. Según me parece, Poincaré está en lo cierto cuando se refiere a este asunto en su libro *La Science et l' Hypothèse*.

LA TEORIA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y LOS AGUJEROS NEGROS

Es posible hallar la relación entre la masa y el radio de un agujero negro esférico teniendo en cuenta que la velocidad máxima que puede alcanzar un objeto, según la teoría de la relatividad, es la velocidad de la luz.

La velocidad de escape en la superficie de un astro esférico será la velocidad máxima que puede alcanzar un objeto para mantenerse en órbita alrededor del astro. Esto ocurrirá cuando la energía cinética del objeto sea igual a la energía potencial debida a la atracción gravitatoria del astro.

La energía cinética según la mecánica clásica es

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

y la energía potencial es $E_p = GmM/r \quad (2)$

Siendo v la velocidad del objeto en órbita, m la masa del objeto en órbita, M la masa del astro, r la distancia desde el centro del astro hasta el punto donde se encuentra el objeto en órbita y G la constante de gravitación universal.

Igualando la energía potencial con la energía cinética y despejando la velocidad obtenemos la ecuación de la velocidad de escape:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

(3)

entonces para una velocidad de escape igual a la velocidad de la luz c y despejando M/r de la anterior fórmula obtenemos

(4)

como $c = 2.99793 \times 10^8$ m/s y $G = 6.6732 \times 10^{-11}$ Nm²/kg² obtenemos que

$$M/r = 6.734 \times 10^{26} \text{ kg/m}$$

que será la relación entre la masa y el radio de un cuerpo esférico para que sea un agujero negro. Con esta relación podemos hallar el radio que deberían tener diversos objetos estelares para ser un agujero negro.

TABLA DE RADIOS CORRESPONDIENTES A AGUJEROS NEGROS

MASA	RADIO
1 sol (2 x 10 ³⁰ Kg)	3 Km
25 soles (gigantes azules)	75 Km
1000 soles	3000 Km
10 ⁷ soles (núcleo galáctico)	3 x 10 ⁷ Km
10 ¹¹ soles (galaxia)	3 x 10 ¹¹ Km

Pero esto es mezclar la teoría de relatividad con la mecánica clásica, ya que la ecuación de la energía cinética de un cuerpo según la relatividad especial es diferente a la clásica:

(5)

Así se obtiene una velocidad de escape relativista (V_{er}):

(6)

Así se observa que la velocidad de escape nunca podrá alcanzar la velocidad de la luz más que en un astro de masa infinita o radio cero.

Pero esto es considerando únicamente la teoría de la relatividad especial. Si tenemos en cuenta la teoría de la relatividad general de Einstein, aparecen unas nuevas consecuencias muy interesantes.

LA RELATIVIDAD GENERAL Y LOS AGUJEROS NEGROS

Según la teoría de la relatividad general de Einstein, en las cercanías de una gran masa el tiempo transcurre más despacio debido a la acción gravitatoria.

Einstein dedujo la siguiente fórmula

(7)

siendo $x = 8\pi G/c^2$

t' = tiempo transcurrido a una distancia r del centro de gravedad de la masa (un astro) productora del campo gravitatorio

t = supuesto tiempo objetivo (transcurrido en las lejanías del campo gravitatorio)

ρ = densidad del astro

V_0 = Volumen del astro

r = distancia desde el centro del astro hasta el punto del espacio que estamos analizando.

Entonces sustituyendo x por su valor se obtiene

(8)

y como es la masa M del astro dividida por el radio r , se obtiene:

(9)

y como según la ecuación (3) $2GM/r = v^2$ siendo v la velocidad de escape clásica a la distancia r del centro del astro, obtenemos

(10)

De aquí se deduce que *a medida que un cuerpo se acerca a un astro el tiempo transcurre más despacio* para éste cuerpo, en función de la velocidad de escape del astro (desde un punto de vista clásico), de modo que cuando se llegue a una distancia tal que la velocidad de escape clásica sea igual a la velocidad de la luz, el tiempo se detendrá para el objeto situado en ese lugar. O sea para $r = 2GM/c^2$ que es el llamado **radio de Schwarchild**.

Aparece así una superficie esférica alrededor del agujero negro en la cual el tiempo se detiene. Esta superficie esférica es el llamado **horizonte de sucesos** del agujero negro.

Al atravesar este horizonte el tiempo vuelve a existir pero con componentes imaginarias (el cálculo del tiempo transcurrido en el interior del horizonte de sucesos nos lleva a una raíz cuadrada de un número negativo), lo cual nos lleva a pensar que el tiempo transcurre en el interior de un agujero negro tal vez en una quinta dimensión perpendicular tanto a las tres espaciales como a la temporal normal.

Además la teoría de la relatividad general nos dice que el **espacio se curva** alrededor de una masa de tal forma que un rayo de luz que pasara rozando esa masa se desviaría el doble de lo que lo haría si estuviera afectado por la gravedad desde un punto de vista clásico (como partícula). Así Einstein obtuvo realizando

algunas aproximaciones que la desviación era:

(11)

que nos proporciona un ángulo de 1,75 segundos de grado en un rayo de luz que pase rozando el sol. Esto fue comprobado mediante la observación de eclipses.

También obtuvo que la luz emitida por una estrella debía tener un espectro algo desplazado hacia el rojo, o sea que la luz emitida tendrá una frecuencia menor de lo normal debido a que todos sus electrones vibrarán con más lentitud a causa de sea detención parcial del tiempo obteniendo la fórmula:

Podemos apreciar que si el radio fuera $2GM/c^2$ (radio del horizonte de sucesos) la frecuencia sería cero y por lo tanto no veríamos la luz procedente de la estrella.

Se calcula que para dicho radio la curvatura del espacio sería tal que la luz quedaría atrapada en el agujero. De esta forma al acercarnos al horizonte de sucesos las tres coordenadas espaciales normales se curvan de tal forma que cualquier movimiento en el interior del agujero se produciría en dirección hacia el centro de éste.

De este modo todo lo que traspase el horizonte de sucesos no podrá salir jamás.

PRUEBAS DE RELATIVIDAD

La teoría de la Relatividad Especial y General, es una de las teorías científicas que la gente en general más conoce de oídas, pero realmente no muchos saben lo que realmente significa y más bien creen que es un juego de los físicos para pasar el tiempo sin ningún tipo de consecuencia real ni consistencia en nuestro mundo. Por ello en este pequeño artículo presentaré la mayoría de las pruebas que nos demuestran la verdadera realidad física de la misma, y en concreto lo que es uno de los mayores éxitos de la teoría de la Relatividad a la hora de ser corroborada con las informaciones obtenidas de la observación astrofísica, el PSR 1913+16. Esto debe de servir para que nos creemos una visión de la teoría desde un punto de vista Realista , y desterrar por completo la tendencia no solo en relación con la relatividad, sino también en mecánica cuántica o en otras teorías , que las asumen desde el punto de vista del Positivismo Lógico.

PRUEBAS RELATIVISTAS CLASICAS

Desviación de la Luz bajo campos gravitatorios :

La teoría de Einstein nos dice, que cualquier masa curva la estructura del espacio-tiempo según lo define el "tensor matemático" de Rieman , para demostrarlo Einstein ideó un experimento muy inteligente, que consistía en la medición en primer lugar de las posiciones de un grupo de estrellas de una zona determinada de la bóveda celeste que correspondía con la porción de cielo donde se iba a producir un eclipse. Allí por primeros de siglo la Real Sociedad Británica de Astronomía organizó una expedición para la medición de las posiciones que se encontraban, justo detrás del sol para que no fueran deslumbradas por la gran luminosidad del sol se realizó la observación cuando se producía un eclipse.

Posteriormente cuando se cotejaron las dos observaciones se observó, como Einstein había predicho, que las posiciones respectivas no coincidían y en concreto en un factor de $1.7'' \pm 0.1$ de arco como exactamente Einstein predijo.

Desviación del perihelio de Mercurio:

Este fenómeno astronómico fue observado mucho antes de que Einstein naciera, y fue una de las pocas pruebas de esa época utilizada para criticar la mecánica Newtoniana. Observacionalmente concluimos que el

perihelio (punto de la órbita más cercano al sol) de la órbita de mercurio se mueve exactamente 600" de arco / año. Considerando todas las posibles perturbaciones debidas al resto de los planetas, etc, podemos justificar 554" de desviación pero ¿ Que pasa con esos 46" restantes ? alguien podría decir : Va ! 46" no importan, pero la física no pueda actuar así. Por ello la única teoría realista que justifica tanto los 554" como los 46" es la Relatividad Einsteniana, lo que su verdadera validez.

PRUEBAS RELATIVISTAS MODERNAS

Desplazamiento al rojo de los fotones:

Aunque ya existe un precedente que de esta prueba que se podría englobar dentro de las pruebas clásicas, era completamente segura, ya que introducía pequeños inconvenientes técnicos, por ello me limitare a exponer la moderna experiencia realizada en la Universidad de Harvard en el año 1965 que se presenta de la siguiente forma:

Construyeron una torre muy alta, y desde la cima enviaron una señal electromagnética hasta el suelo, según la teoría la curvatura que ejerce la masa de la tierra sobre el espacio-tiempo provocaría un corrimiento al rojo en el espectro y así se comprueba experimentalmente.

Aumento del periodo de vida medio de las partículas subatómicas:

La tierra se ve continuamente bombardeada por los denominado rayos cósmicos, los cuales están compuestos en un 80% por protones en un 20% por heliões y una pequeñísima porción de átomos pesados. Bien, cuando los protones chocan con las moléculas de aire de la parte superior de la atmósfera producen una lluvia de otras partículas subatómicas conocidas por el nombre de muones, experimentalmente hemos observado que esta partícula posee un periodo medio de vida de dos millonésima de segundo, si esto es así ¿ Como es posible que en la cima del monte Washington, en New Hampshire se hayan detectado gran cantidad de muones? La Relatividad soluciona este problema, concretamente se observo que poseían una velocidad equivalente al 99.4% de la velocidad de la luz lo que ocasiona que el reloj interno de la propia partícula se ralentice, se calcula que el periodo de vida alterado le dota de un periodo de vida de 16 segundos lo que le permite llegar hasta la superficie de la tierra cosa que de lo contrario sería imposible.

Estos experimentos que poseen un margen de error del 1% fueron mejorados por un grupo de científicos del CERN reduciendo el error a un 0.1% acelerando partículas subatómicas equivalentes a 99.94% de la velocidad de la luz.

Aumento de la masa de las partículas subatómicas: Algunas partículas ligeras como los electrones pueden ser acelerados a velocidades similares a: $0.9999999999999999c$, es decir casi no se puede estar más cerca de la velocidad de la luz. Y se ha obtenido, midiendo los grados de desviación sobre determinados campos, que su masa a aumentado en un factor de 100.000 veces su masa original. Bien , ¿ De donde sale este sorprendente hecho ? lo podemos comprender a través de la siguiente argumentación matemática:

Las partículas contraen su radio (contracción longitudinal) según la fórmula de FitzGerald , que proviene de las primeras teorías compensatorias a raíz del experimento de Michelson–Morley :

$$L' = L \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad [\text{Ec.A}]$$

Sustituyendo los símbolos L y L' (longitud original y longitud contraída) por R y R' (radio original y radio contraído) escribimos la ecuación:

$$R' = R \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$R' / R = \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Puesto que la masa de una partícula es inversamente proporcional al radio escribimos la siguiente igualdad:

$$R' / R = M / M'$$

$$M / M' = \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Y por consiguiente:

$$M' = \sqrt{1 - v^2 / c^2} / M \text{ [Ec.B]}$$

Ec.B es lo que se conoce como la ecuación de Lorentz y es perfectamente utilizable como la ecuación de FitzGerald original Ec.A Lo que verifica experimentalmente de manera rotunda el hecho de la contracción longitudinal.

Por otra parte aunque este hecho no sea muy intuitivo podemos asimilar el hecho del aumento de la masa debido a velocidades relativistas de la siguiente manera; lo que hacemos en el acelerador de partículas es inyectar en el sistema energía en forma de electricidad, puesto que sabemos según $E = mc^2$ que la masa equivale a la energía la misma energía es integrada por las partículas en forma de masa.

Confirmación a través de satélites artificiales:

La NASA en colaboración con el departamento de defensa Norteamericano puso en órbita el NAVSTAR 2 satélite que orbitó la tierra a unos 20.000 Km. de altura, el cual llevaba a bordo un reloj atómico de alta precisión, que era comparado con otros que se encontraban en tierra que previamente habían sido sincronizados con el propio de reloj del satélite. Según la teoría de la Relatividad especial el reloj del satélite debe de ir más lento debido a la diferencia de velocidad entre el mismo y los relojes terrestres.

Desgraciadamente la relatividad general en contra partida dice, que los relojes van más lentos en las cercanías del centro de campos gravitatorios (en este caso obviamente los que se encuentran en la tierra) por ello si el satélite estuviera a 1.5 radios terrestres estropearía las mediciones anulando ambos efectos, es por ello que el Navstar 2 se encontrará a 4.2 radios terrestres. La suma de ambos efectos produce a lo largo de un día una diferencia de 38.5 microsegundos, periodo con nuestros medios tecnológicos para ser irrefutablemente establecido.

El PSR 1913+16 :

Este pulsar binario fue descubierto por Hulse y Taylor en 1974 por casualidad desde el radiotelescopio de Arecibo, hoy sabemos que los pulsars son estrellas neutrónicas en rápida rotación que emiten un potente pulso electromagnético que corresponde con sus chorros de eyección o " jets ". Se observó que poseía un periodo de 0.059 segundos, pero lo que resultó ser realmente extraño es que este variase 30 microsegundos de un día para otro, cuando los demás pulsars observados poseían una invariabilidad de del orden de 0.000001 (algo impresionante !).

Hulse y Taylor descubrieron que esto era debido a una desviación al rojo, debido a una órbita sobre otra compañera con un periodo de 7.75 horas. Utilizando las técnicas usuales de análisis del espectro encontraron que el sistema poseía una velocidad orbital de 200 km/s. Esto significaba que el PSR 1916+13 era el sistema idóneo para el estudio de sistemas orbitantes sobre campos gravitatorios fuertísimos.

Este sistema también se ofrecía para la corroboración de la predicción de ondas gravitatorias de cuerpos en movimiento. En este caso el pulsar al perder energía por la emisión de ondas, la órbita se contrae 3.1

milímetros por periodo, lo que a lo largo de los años se ha podido poner de manifiesto, y que según dijo Roger Penrose en unas conferencias dictadas en la Universidad de Oxford suponen la confirmación de la Relatividad General más precisa jamás hecha alrededor de una precisión de 10^{40} .

EL IMPACTO DE LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Si nos preguntasen por una teoría científica importante, muchos de nosotros pensaríamos en la Teoría de la Relatividad (TR). Aún sin conocerla a fondo, o sin conocerla en absoluto, tenemos referencias sobre ella y sabemos que goza de una popularidad universal.

Sin embargo, no se trata de una teoría básica en la práctica. Ni siquiera se estudia de un modo profundo en gran parte de los planes universitarios de física. ¿Por qué, entonces, se considera una revolución científica a la teoría y un genio a su creador, Albert Einstein?.

Deberíamos comenzar desde el primer momento a despejar cualquier tipo de duda acerca de la trascendencia de la TR. El hecho de que no se utilice en el tratamiento de los problemas cotidianos es debido a que éstos se complican sumamente, mientras que su resolución por "métodos clásicos" proporciona una solución perfectamente válida.

El trabajo de Einstein aparecía en 1905 como una revolución intelectual sin parangón. Retrocedamos en el tiempo y fijémonos brevemente en las ideas que dominaban en el momento en que Einstein publica la TR.

En 1687 sir Isaac Newton publica sus "Principios matemáticos de la filosofía natural". Esta obra monumental, crucial en la historia de la ciencia, pone las bases y las herramientas matemáticas necesarias para el desarrollo de la física. Todo aquello que surge basándose en las famosas "Leyes de Newton" constituye la mecánica clásica.

Lo importante en este momento es que comprendamos en qué marco concibe Newton los sucesos físicos. En cuanto al espacio, distingue entre:

- Espacio absoluto, que "por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmovible".
- Espacio relativo, determinado por nuestros sentidos de acuerdo con sus posición con respecto a los cuerpos.

Por lo que se refiere al tiempo, considera la existencia de un "tiempo absoluto, verdadero y matemático", que fluye sin relación alguna con nada externo. De este modo, se observa cómo Newton piensa que el tiempo tiene existencia propia y objetiva y que, de algún modo, también existe un sistema de referencia absoluto que permanece en reposo.

Es en este punto donde surge la ruptura radical entre la Teoría de la Relatividad y la física clásica. Tenemos en esta teoría un ejemplo de creación científica a partir de una intuición genial. A un jovencísimo Einstein (16 años) se le planteó la siguiente paradoja: las ecuaciones de Maxwell demostraban que la luz es la propagación de oscilaciones del campo electromagnético a través del espacio. Así pues, si de algún modo consigo viajar junto a un rayo de luz, a su misma velocidad, observaré campos electromagnéticos oscilantes en el tiempo y en reposo. A la mente de Einstein esto le parecía absolutamente imposible. Intuitivamente sabía que este fenómeno no podía darse (además, las ecuaciones de Maxwell también negaban la existencia de tal cosa). Sería esta precoz intuición la que años más tarde le llevaría a establecer los dos postulados fundamentales de la Teoría Especial de la Relatividad:

- Las leyes físicas son las mismas para todos los sistemas de referencia inerciales (es decir, aquéllos que se mueven con velocidad constante unos respecto al otro).

- La velocidad de propagación de la luz en el vacío es la misma para cualquier sistema de referencia inercial.

El segundo postulado significa que veremos la misma velocidad para un mismo rayo de luz si estamos en la Tierra que si, por ejemplo, viajamos a gran velocidad en un cohete (lo cual no deja de ser sorprendente).

Partiendo de estos principios que a Einstein le aparecían evidentes e indudables: Sean O y O' dos sistemas de referencia que se mueven con velocidad relativa constante V en la dirección del eje x uno respecto del otro. Cuando los orígenes coinciden (es decir, cuando O y O' están en el mismo punto), lanzamos un rayo de luz desde ese origen, que transcurrido un tiempo alcanza P .

Donde r_x es la componente x del vector posición y t el tiempo medido por O para el trayecto del rayo de luz (lo mismo para r'_x respecto a O'). Hay que tener en cuenta que según el principio de la relatividad, los dos observadores, O y O' ven la misma velocidad para el rayo de luz, c . Si nos fijamos en la figura, r_x y r'_x son evidentemente distintos, luego t ha de ser forzosamente distinto de t' .

OBSERVACIONES GENERALES

- En mi opinión, la teoría presentada aquí es la más simple teoría relativista de campo, y es perfectamente posible. Pero esto no significa que la naturaleza no pueda obedecer a una teoría de campo más complicada.

Frecuentemente se ha propuesto teorías de campo más complejas, que se pueden clasificar según las características siguientes:

- Aumento del número de dimensiones del espacio. En este caso hay que explicar por qué el espacio esta aparentemente restringido a cuatro dimensiones.
- Introducción de campos de diferente clase (por ejemplo un campo vectorial) además del campo de desplazamiento y su campo tensorial correspondiente g_{ik} (o g^{ik}).
- Introducción de las ecuaciones de campo de orden (de diferenciación) superior.

A mi parecer, tales sistemas mas complicados y sus combinaciones, deberían considerarse solamente si existieran razones físico-empíricas para hacerlo.

- Una teoría de campo no está completamente determinada por el sistema de ecuaciones de campo. ¿Debería admitirse la aparición de singularidades? ¿Deberían postularse condiciones frontera? Mi opinión para la primera pregunta es que deben excluirse las singularidades. No me parece razonable introducir dentro de una teoría del continuo puntos (o líneas, etc.) para las que no sean válidas las ecuaciones de campo. Además, la introducción de singularidades es equivalente a postular condiciones frontera (que son arbitrarias desde el punto de vista de las ecuaciones de campo) en «superficies» que encierran a las singularidades. Sin tal postulado la teoría es demasiado vaga. En mi opinión la contestación a la segunda pregunta es que es indispensable el postular las condiciones frontera.
- ¿Se puede concebir que una teoría de campo permita comprender la estructura atómista y cuántica de la realidad? Casi todo el mundo contestará a la pregunta con «no». Pero yo creo que hoy en día nadie sabe algo seguro sobre esto, debido a que no podemos averiguar de que manera y cuanto se reducen a las múltiples soluciones por la exclusión de singularidades. No poseemos ningún método para obtener sistemáticamente soluciones que estén libres de singularidades. Los métodos de aproximación no son validos, dado que nunca se sabe si allí existe o no solución exacta libre de singularidades, para una solución particular aproximada. Por esta razón no podemos comparar hoy el contenido de una teoría no lineal de campo con la experiencia.