

## Capítulo I

*“Afirmar que la predicción es el propósito de una teoría científica es confundir los medios con los fines. Es como decir que el propósito de una nave espacial es quemar combustible...”*

*David Deutsch – “La Estructura de la Realidad”*

# GENERALIDADES

## ¿QUÉ ES LA RELATIVIDAD?

La Relatividad es una teoría desarrollada para describir, mediante ecuaciones matemáticas, las interacciones en el mundo físico.

Esta teoría puede dividirse en dos grandes ramas.

- La Relatividad Operativa.
- La Relatividad Conceptual.

La primera se encarga de describir el cosmos, tanto en pequeña como en gran escala. Para ello nos aporta una serie de ecuaciones que reflejan, matemáticas mediante, el comportamiento del mundo físico.

En pocas palabras, la Relatividad Operativa es una herramienta de trabajo. Como tal, se la emplea rutinariamente en el quehacer científico y tecnológico.

La segunda rama es bastante diferente. Adentrarse en la Relatividad Conceptual implica, inevitablemente, invadir los terrenos de la Filosofía. Tratar de entender la Relatividad es tratar de entender el mundo que nos rodea. No a través de ecuaciones, sino a través de conceptos.

De modo que podemos definir a la Relatividad Conceptual no como herramienta sino como objeto de estudio.

Podemos pensar en ambas ramas como hermanas gemelas de muy diferente carácter.

La Relatividad Operativa es la que ha triunfado en el mundo de la ciencia. Cuando se habla de los éxitos de la Relatividad, se hace mención a los éxitos de sus ecuaciones. Y este éxito es un hecho innegable: El Universo físico se comporta tal y como lo muestran las ecuaciones relativistas. Sus predicciones son excelentes.

Pero..., la rama conceptual no ha logrado el mismo éxito.

La hermana operativa es extrovertida, le gusta el espectáculo y el gran público.

La hermana conceptual es introvertida. No se escribe mucho sobre su vida. De hecho hay muchos autores que la esconden porque dicen que es difícil de presentar en sociedad. Cada vez que aparece en escena surge algún problema. Esta hermana se comporta como esos niños molestos que permanentemente preguntan ¿Por qué? Finalmente terminan cansando al interlocutor, que responde de mala manera y obliga al niño a callar.

A tal punto esta gemela conceptual es difícil de introducir en sociedad, que casi no se escribe sobre ella. En los cursos de física se pasa muy rápidamente de los conceptos a las ecuaciones. En general se pasa a resolver problemas cuando la clase comienza a tornarse entretenida para el alumno e incómoda para el profesor.

Como consecuencia, al no alternar en sociedad, esta hermana gemela se ha quedado en su infancia. Parafraseando la propia historia de los gemelos relativistas, podríamos decir que a la hermana conceptual la hemos enviado de viaje, para que no moleste en el trabajo rutinario. En consecuencia sus relojes han marchado más lentamente.

Se puede afirmar que la hermana conceptual no ha alcanzado la madurez pues actualmente se siguen planteando las mismas preguntas que hace 100 años. Pero no se las plantea en los foros especializados. Son sólo preguntas de estudiantes curiosos que no se quedan conformes con una simple afirmación. Estos estudiantes buscan explicaciones.

Llevado al lenguaje más simple, la Relatividad Operativa responde a los ¿Qué? y a los ¿Cómo? de la naturaleza. La hermana más tímida trata de responder los ¿Por qué?

Aunque no lo parezca, es la verdadera hermana revolucionaria.

Dentro de este panorama simplificado, esta obra está concebida para entregarle el documento que acredite su mayoría de edad a la Relatividad Conceptual. Todos los análisis y desarrollos que se presentan están destinados a validar las ecuaciones relativistas desde el punto de vista conceptual.

El camino no es fácil. Se está recorriendo a tropezones desde hace 100 años.

Pero espero que sea entretenido. Adicionalmente, este camino abre la puerta a otros caminos que resulta imposible recorrer cuando uno se aparta del sendero de las explicaciones.

***Nota:** Si el lector esperaba que al hablar de las dos ramas de la relatividad, mencionara la Relatividad Especial y la General, ya puede ir apreciando que el enfoque de esta obra es algo diferente al de los libros de texto convencionales sobre Relatividad.*

## ¿QUIÉNES SE INTERESAN EN LA RELATIVIDAD?

Entre la gente interesada en entender o en averiguar de qué trata la Teoría de la Relatividad se encuentra:

- Gente que cree que Einstein era un genio y tenía razón en la gran mayoría de sus afirmaciones.
- Gente que piensa que Einstein era una persona normal, a quien las circunstancias hicieron famoso.
- Gente que afirma que Einstein y sus teorías son el más grande fraude científico de todos los tiempos.

Independientemente de opiniones personales, la teoría de la relatividad es uno de los

pilares de la física moderna y no sólo cambió nuestra manera de ver y entender el mundo físico, sino que influyó notablemente el pensamiento de los grandes filósofos contemporáneos.

El público no especializado asocia la Relatividad con:

- Pérdida de puntos de referencia absolutos (“Todo es relativo”).
- La bomba atómica.
- Los agujeros negros.
- Relojes que enloquecen cuando se mueven a altas velocidades.
- Viajes en el tiempo
- ...

También puede afirmarse que el público en general no tiene muy en claro de qué forma el trabajo de Einstein afecta su vida cotidiana. Pero, inevitablemente, quienes sienten curiosidad por estas teorías manifiestan una notable necesidad de entender el mundo que los rodea. Tratar de entender la Teoría de la Relatividad es una forma de tratar de entender el Universo y nuestra función dentro de él.

Sin embargo la Relatividad Especial (objeto principal de estos desarrollos) ha generado (y genera) una cantidad de opiniones de científicos, y librepensadores no científicos, en su contra. Además de muchas publicaciones y libros, la “Web” da cuenta de numerosas alternativas propuestas para superar las “deficiencias lógicas” de la Relatividad Especial.

***Nota:** Esta situación no demuestra que Einstein estaba equivocado. Sólo indica que sus conceptos son difíciles de aceptar para mucha gente*

## EINSTEIN Y SU OBRA

Einstein es, sin lugar a dudas, uno de los grandes genios de la humanidad. Era la clase de persona capaz de encontrar soluciones al tiempo en que la mayoría está tratando de identificar el problema. Y además tenía la valentía (fortaleza) de aceptar resultados que sus convicciones le decían que eran correctos aunque fueran contra la línea de pensamiento dominante.

Por supuesto que las teorías de Einstein se basan en desarrollos previos, hechos por gigantes de similar talla. Pero eso no resta mérito a su obra.

Sin embargo Einstein (al igual que Newton en su momento) trató de evitar las hipótesis o modelos explicativos. En muchos casos tomó datos de la realidad experimental y los elevó al nivel de postulado. Para sus desarrollos fundamentales eligió algunos postulados coherentes con la información disponible y estudió las consecuencias.

En particular, para desarrollar la Relatividad Especial, Einstein debió llegar a los fundamentos que rigen las interacciones en el mundo físico. En pocas palabras puede decirse que, para derivar las fórmulas de transformación para mediciones entre sistemas en movimiento, Einstein empezó desde el análisis de qué significa la simultaneidad de dos eventos y el sincronismo de relojes para observadores

que no están parados uno al lado de otro.

**Nota:** Si bien la Relatividad analiza el comportamiento de relojes y varillas en función del empleo de señales luminosas, esto no quiere decir que sus consecuencias se aplican sólo a relojes, varillas y rayos de luz. La luz es un fenómeno electromagnético (algo así como una onda formada por campos eléctricos y magnéticos variables), pero también todas las interacciones físicas regulares son interacciones electromagnéticas. Con excepción de la fuerza de gravedad, todo el aspecto del mundo que nos rodea está modelado por interacciones de los electrones externos de los átomos y las diferentes ondas electromagnéticas.

Y esta forma de plantear el problema es un ejemplo de la brillantez de Einstein para distinguir entre lo obvio y lo que no puede aceptarse sin un análisis previo. Por esta razón, cualquier intento de entender la Relatividad Especial implica despojarse de preconcepciones y abrir la mente. El esfuerzo a realizar es importante y la recompensa creo que lo vale. Al final del camino, se entienda o no la totalidad de la teoría, se termina con una visión del universo y de los conceptos de masa, tiempo y espacio que nos obliga a replantear las bases filosóficas del conocimiento.

## **EL APORTE DE ESTE LIBRO**

Se puede seguir el mismo camino que Einstein, recurriendo a sus publicaciones o a los libros de texto, pero éste suele ser un camino arduo. Como ya se dijo, en este libro se trata de estudiar los “**por qué**”. Esta línea conductora requiere un cierto alejamiento del camino seguido por Einstein pero, en mi opinión, es una forma más consistente de satisfacer nuestra necesidad de entendimiento.

Tratar de entender el **por qué** de algo implica un poco de soberbia. Implica creerse capaz de entender el mecanismo íntimo de funcionamiento de las cosas. Empleando un ejemplo de la vida cotidiana, suele interesarnos **cómo** manejar un automóvil, y no **por qué** el motor y el mecanismo asociado son capaces de transformar la energía química en movimiento de traslación.

Dentro de esta línea, en su desarrollo original de 1905, Einstein postuló:

*“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”.*

No trató de explicar por qué ocurre esto. Explicar el **por qué** de un fenómeno implica elegir un modelo que se adapte a la realidad. Y la elección de un modelo es una tarea muy delicada. Es más simple (y menos objetable) decir: “las cosas suceden de tal manera”, o “todo ocurre como si ...”.

Bien, como ya se indicó, una de las preguntas que trata de responder el presente desarrollo es: ¿**Por qué** la velocidad de la luz es la misma para todos los sistemas en movimiento no acelerado?

En la Relatividad Especial, la dilatación del tiempo y la contracción de longitudes son sólo el resultado de emplear adecuadamente las matemáticas sobre unos

pocos axiomas iniciales. Por el contrario, en los desarrollos presentados en estos capítulos se trata de explicar **por qué** se producen estos fenómenos.

## ¿CÓMO SE TRASLADA LA LUZ?

Toda la relatividad nace vinculada, y se asocia, al comportamiento de la luz. Desde chicos oímos, y damos por cierto, que la materia tiene átomos y que la velocidad de la luz es constante. Son el tipo de “verdades” que no cuestionamos pues todo el mundo las da por ciertas. Sin embargo, llegar a estas afirmaciones significó un arduo recorrido para la humanidad.

Conforme a nuestra experiencia, cuando algo se traslada de un lugar a otro, puede hacerlo por dos mecanismos básicos:

- Con independencia de un medio soporte.
- Propagándose en un medio soporte.

Es fácil distinguir entre ambos mecanismos:

En el primer caso, la velocidad de la fuente se agrega a la del objeto (Ej.: Una pelota de Básquet impulsada por un jugador que se está moviendo).

En el segundo caso la velocidad de lo que se emite no se ve afectada por la velocidad de la fuente (Ej.: La velocidad del sonido no depende de la velocidad del emisor). No podemos “empujar” el sonido para que viaje a mayor velocidad.

Cuando se aceptaba, conforme a las teorías de Newton, que la luz estaba formada por pequeños corpúsculos era razonable suponer que no hacía falta un medio que permitiera su traslado de un punto a otro. Esto estaba de acuerdo con la observación de que la luz viaja en línea recta y que atraviesa el vacío sin dificultad.

Sin embargo, al desarrollarse la teoría electromagnética (Maxwell) se fortaleció el concepto de la teoría ondulatoria de la luz. Y, siendo una onda, la luz debería propagarse en algún medio soporte. En favor de la existencia de este medio soporte (al que se llamó “éter”) están las demostraciones de que la luz no es afectada por la velocidad de la fuente.

Al respecto, además de numerosas experiencias de laboratorio, existe una fuente de información inobjetable: Las explosiones de Supernovas en galaxias lejanas.

Dichas explosiones son fenómenos casi instantáneos para la escala de tiempos del universo. Si la velocidad de las ondas dependiera de la velocidad de la fuente, resultaría que durante la explosión, las diferentes partes de la estrella emitirían su señal a diferentes velocidades hacia nosotros. Sin involucrar las velocidades propias de la explosión, alcanza con considerar las velocidades normales de rotación de los cuerpos celestes. Diferencias de tan solo 0.000001 de la velocidad de la luz (casi la velocidad del sonido), se traducen en retardos de varios años cuando la señal debe atravesar distancia de 10,000,000 de años luz. Y se han observado explosiones de Supernovas en galaxias mucho más lejanas, con una duración total de unos pocos días.

El resultado es concluyente.

- La velocidad de la fuente no afecta la velocidad con que se propaga la luz.

**Pregunta:** ¿Existe, entonces, un medio en el que se propagan las ondas luminosas?

**Respuesta:** Hasta el advenimiento de la Relatividad Especial la respuesta dada por la corriente científica dominante era afirmativa, pese a que todas las pruebas de la existencia del “éter” eran indirectas.

No obstante se especulaba con respecto a las propiedades físicas del éter. Lo que sigue está copiado de un artículo acerca del éter que forma parte del Diccionario Enciclopédico Hispano-Americano (Editado por Montaner y Simon y W. M. Jackson, Inc. a comienzos del siglo XX pero con muchos artículos redactados en ediciones del siglo XIX).

*“... La transformación del movimiento en luz, en calor y electricidad, parece aducir una prueba más en pro de la existencia del éter, cuyas principales propiedades a continuación se exponen:*

*Es inerte, como lo demuestra el cambio de movimiento entre aquél y la materia.*

*Es sumamente elástico porque la propagación de la luz en un medio varía con el grado de elasticidad del medio: luego propagándose en el éter con la velocidad de 298,000 kms. por segundo, resulta que la elasticidad de este fluido tiene que ser inmensa.*

*Es discontinuo, contra lo que algunos afirman, como lo demuestra el fenómeno de la polarización.*

*No es la difusión de las atmósferas planetarias pues de lo contrario se opondría a la ley de Mariotte: la elasticidad es proporcional a la densidad.*

*Es un fluido material, contra la opinión de algunos físicos que deducen la inmaterialidad de la imponderabilidad del éter, sin echar de ver que la gravedad no es esencial de la materia, como lo es la inercia.*

*No se puede afirmar ni negar que sea denso porque la densidad de un cuerpo es siempre relativa y, hasta el día, no se ha encontrado medio de comparar el éter a una sustancia ponderable cualquiera.*

*Tampoco se puede afirmar de una manera absoluta que sea imponderable.*

*Los físicos modernos y que son partidarios del éter, tienden a referir todas las fuerzas a una sola, la gravedad, y toda la materia al éter. Algunos de éstos van más allá y suponen que la gravitación pudiera tener su origen en los diversos grados de condensación de la masa etérea ....”*

Sin embargo, todos los intentos por poner de manifiesto, en forma incuestionable, las propiedades del éter, fracasaron.

Dentro de este escenario es donde Einstein “tomó el toro por las astas” y planteó un desarrollo en el que el éter dejaba de ser motivo de análisis. La Teoría Especial de la Relatividad representa uno de los pasos más audaces del pensamiento humano. Pero también es un símbolo de la búsqueda de la verdad científica a través de los postulados más simples posibles.

---

## LA RELATIVIDAD EN ECUACIONES

Pese a que este libro está destinado a quienes están familiarizados con la Relatividad Especial, no es imposible que, para algunos lectores, este libro sea el primer contacto con las ideas de Einstein.

A ellos les recomiendo que comiencen leyendo libros de divulgación y, si es posible, libros de física universitarios. Allí podrán encontrar una introducción formal a esta teoría.

En este libro no se incluyen desarrollos formales explicando el funcionamiento del interferómetro de Michelson o las experiencias con la luz de Roemer, Airy, Fizeau, Sagnac y otros tantos brillantes investigadores.

Sin embargo, para provecho de aquellos lectores que, sin estudios previos sobre la relatividad, decidan leer estas páginas, trataré de resumir la teoría de la Relatividad Especial en unos pocos párrafos sin demostración.

La Relatividad Especial estudia la interrelación de magnitudes físicas (velocidad, masa, tiempo, etc.) entre sistemas en movimiento relativo rectilíneo uniforme, en los que se cumplen las leyes de la mecánica de Newton. A estos sistemas se los conoce, genéricamente, como Sistemas Inerciales.

La experiencia muestra que las leyes de la física son válidas en cualquier sistema inercial. En otras palabras, el estado de movimiento uniforme, no acelerado, no genera cambios detectables de las leyes físicas. A la inversa, no pueden emplearse las mediciones físicas para poner en evidencia la velocidad de desplazamiento absoluto de los sistemas inerciales. Sólo se pueden estudiar fenómenos de movimiento relativo.

En particular, la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío (conocida comúnmente como velocidad de la luz y representada con la letra "c"), ha demostrado tener el mismo valor en todos los sistemas inerciales.

Los dos párrafos previos, que constituyen una versión algo libre de los dos postulados de Einstein, conducen a ecuaciones conocidas como transformadas de Lorentz.

Estas ecuaciones y sus consecuencias físicas y lógicas se analizan en detalle en esta obra.

En la práctica dichas ecuaciones conducen a otras más fáciles de visualizar:

Si llamamos  $L$  a la longitud de una varilla perteneciente a un determinado sistema inercial y consideramos que existe otro sistema inercial, que se mueve a velocidad  $v$  con respecto al primero, ocurre que la longitud de la varilla, medida desde este nuevo sistema inercial, adopta el valor  $L'$ , de modo tal que las dos longitudes se vinculan mediante la ecuación:

$$\bullet L' = L \times (1 - v^2/c^2)^{0.5}$$

En esta expresión se asume que la varilla está orientada en forma paralela a la dirección del desplazamiento relativo entre ambos sistemas.

Por otro lado si, en el primer sistema inicial, transcurre un intervalo de tiempo que



## **Generalidades**

---

podemos denominar  $T$ , los observadores del segundo sistema inercial detectan que dicho intervalo dura un tiempo  $T'$ , vinculado al primero por la ecuación:

- $T' = T / (1 - v^2/c^2)^{0.5}$

Y, dado que la expresión  $(1 - v^2/c^2)^{0.5}$ , conocida como coeficiente de Lorentz, es siempre menor que 1, resulta que, desde cualquier sistema inercial, se observa un acortamiento de las varillas y una marcha más lenta de los relojes móviles.

Pero, debido a la mencionada equivalencia de los sistemas inerciales, el fenómeno es recíproco.

- Desde un sistema inercial se observan varillas más cortas y relojes más lentos en el otro sistema.
- Desde el segundo sistema inercial se observan varillas más cortas y relojes más lentos en el primer sistema

Esta reciprocidad de observaciones es la base de los problemas lógicos atribuidos, por algunos estudiosos, a la teoría de la Relatividad Especial.

En pocas palabras, dado que ambos sistemas observan que los relojes del otro sistema marchan más lentamente, debería ser posible resolver la discrepancia confrontando dichos relojes.

Pero..., la cosa no es tan sencilla.

Hace ya 100 años que se vienen discutiendo innumerables variantes de esta situación conocida como "Paradoja de los Gemelos".

- Para algunos no existe tal paradoja.
- Para otros es una paradoja insoluble.
- Para otro grupo carece de sentido analizar este punto.
- Para conocer mi propia opinión es necesario adentrarse en los próximos capítulos. ☺