

Espacio y Tiempo

Consideraciones actuales sobre la Teoría de la Relatividad

Por Hugo A. FERNÁNDEZ

La Teoría de Relatividad no es un modelo sobre el movimiento de los cuerpos, o de la Mecánica o del Electromagnetismo, ni sobre alguna disciplina particular de la Física. Es una teoría sobre el espacio y el tiempo, que trata sobre sus propiedades y de qué manera ellas inciden y regulan las leyes sobre el comportamiento de los fenómenos naturales.

Tratemos de describir brevemente algunos aspectos de interés sobre la evolución que sufrieron estos conceptos básicos fundamentales.

La experiencia mostró que el espacio físico (tridimensional) posee una *simetría* particular por la cual el tamaño y la forma de los objetos materiales en reposo respecto de un observador no dependen de la posición ni de la orientación del objeto.

Este simple hecho permite determinar empíricamente una unidad de medida espacial e introducir el concepto de *distancia*, requisito necesario para reconocer la geometría correspondiente al espacio, que resultó la *euclídea*, válida para todo observador.

Estas propiedades se conocen hoy como ***homogeneidad e isotropía del espacio***.

Análogamente, por observación de los fenómenos naturales periódicos se asumió que el tiempo físico, concepto que permite ordenar la ocurrencia de sucesos ("antes" y "después"), era una magnitud unidimensional mensurable que admite una definición similar a la de distancia, llamada *intervalo* o *duración*. La experiencia mostró también que el tiempo físico poseía una simetría particular por la cual la duración de un dado evento causal, bajo idénticas condiciones, no dependía del lugar de ocurrencia ni del instante de inicio.

Esta propiedad actualmente se denomina ***uniformidad del tiempo***.

Hasta fines del siglo XIX se suponía que el espacio y el tiempo eran magnitudes independientes con valores absolutos, por lo cual toda medición de distancia o de intervalo era idéntica para todo observador. Nuestro Universo era tridimensional, de geometría euclídea, y solamente su evolución requería el análisis temporal, sin que ello incidiera en las propiedades del espacio.

La métrica del espacio (euclídeo tridimensional) era invariante, condición que puede expresarse en coordenadas cartesianas mediante:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad \text{Invariante}$$

Esta interpretación, aceptada durante más de dos milenios, puede ser entendida con un ejemplo cotidiano. Supongamos tener una dada secuencia de fotos de un móvil, obtenidas a intervalos conocidos y cámara fija, tal que el movimiento del objeto puede estudiarse por comparación y así conocer la evolución del fenómeno dinámico.

Cada foto será distinta pero ellas siguen siendo bidimensionales, su métrica espacial es la misma (y su escala se conserva).

Los trabajos de Lorentz y Poincaré, aparecidos alrededor del año 1900, mostraron que las "distancias" e "intervalos", medidos sobre un mismo fenómeno por observadores en movimiento relativo, daban resultados distintos y dependientes de la velocidad entre observadores. La geometría espacial seguía siendo euclídea para cada observador pero las distancias y los intervalos medidos no eran idénticos (nacía la relatividad post Galileo), es decir que **la métrica euclídea tridimensional no era invariante**.

Con el advenimiento de la Teoría de Relatividad de Einstein (1905) quedó claramente establecido que para todo observador inercial el espacio y el tiempo conservaban las históricas propiedades, pero sus métricas (espacial y temporal) diferían entre sistemas de referencia con movimiento relativo constante. Las transformaciones de Lorentz eran las relaciones funcionales que vinculaban dos sistemas de referencia inerciales.

Sin embargo, inicialmente no se entendió que esta relación funcional (Lorentz) entre sistemas de referencia inerciales implicaba algo mucho más profundo: el Universo era esencialmente de cuatro dimensiones.

Este descubrimiento se debió a Minkowski (1908) quien se percató que la pérdida de invariancia de la métrica euclídea espacial era debida a la relación existente entre el espacio y el tiempo, por lo cual la métrica correcta debía contener al tiempo.

La adecuada métrica invariante en cuatro dimensiones se deduce fácilmente de las Transformaciones de Lorentz, resultando:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad \text{Invariante}$$

Debido a los signos distintos de las partes espacial y temporal en el segundo miembro, esta métrica se denominó seudoeuclídea a propuesta de Klein y Hilbert.

Importantes estudios contemporáneos han mostrado que las propiedades de simetría del espacio y el tiempo, representadas mediante su métrica en un espacio de cuatro dimensiones (y su invariancia), son suficientes para fundamentar la Teoría de Relatividad Especial, sin necesidad de recurrir a los postulados propuestos por Einstein.

Específicamente se ha demostrado que si aceptamos que los fenómenos que ocurren en nuestro Universo responden a una métrica cuatridimensional seudoeuclídea del espacio-tiempo, entonces el Principio de Relatividad y la existencia de una velocidad tope y absoluta pueden ser obtenidos como consecuencias.

De acuerdo con el notable físico ruso A. Logunov, la Teoría de Relatividad queda rigurosamente establecida postulando que **los fenómenos físicos suceden en un espacio cuatridimensional cuya geometría es seudo euclídea**.

Consecuencias

Esta formulación moderna de la Relatividad Especial (Logunov, 1996) reviste una extraordinaria importancia ya que establece rigurosamente que las condiciones de validez de la teoría dependen única y exclusivamente de las propiedades del espacio y el tiempo asignadas. No es necesario postular la constancia de la velocidad de la luz ni el Principio de Relatividad.

Es fundamental resaltar que la homogeneidad e isotropía del espacio, la uniformidad del tiempo, y la métrica seudo euclídea invariante, que convalidan la Teoría Especial de Relatividad, son exactamente los mismos postulados que fundamentan los llamados Principios Universales de conservación (Teorema de Emmy Noether, 1915), por lo cual todas las leyes válidas en esta teoría poseen la misma jerarquía que las leyes de conservación de la energía, de la cantidad de movimiento y del momento angular.

En consecuencia, el extraordinario descubrimiento hecho por A. Logunov nos pone frente a una integración histórica de las leyes relativistas de la Física y los Principios Universales, generando una situación crítica, ya que el incumplimiento de cualquiera de estas leyes relativistas que signifique invalidar sus fundamentos obligará a revisar todo el conjunto, pues todas ellas se derivan de los mismos postulados básicos.

Asimismo, la existencia de una velocidad máxima posible, única y absoluta, obtenida como consecuencia de asumir una geometría seudo euclídea del espacio-tiempo y su métrica invariante, clarifica que cualquier modelo teórico que proponga otra alternativa, tal como atribuir velocidades máximas diferentes para la gravedad y el electromagnetismo (T. van Flandern, *"The speed of gravity - What the experiments say"*, 1998; S. Kopeikin, *"Bi-metric theory of gravity"*, 2006, etc.), poseerá una métrica espacio temporal diferente a la seudo euclídea.

Dado que la forma matemática de una ley tiene implícita la geometría utilizada, las leyes que describen el comportamiento de los fenómenos serán distintas en marcos teóricos que usen diferentes métricas.

Destaquemos la evidente incompatibilidad entre las teorías General y Especial, debida a que las propiedades establecidas en cada caso para el espacio y el tiempo son contradictorias y antagónicas entre sí. Ante la presencia de masa ambas teorías tienen métricas espacio temporales distintas, lo que implica que los fenómenos se interpretan de manera distinta y, por supuesto, responden a leyes diferentes.

Como vemos, existe una profunda sutil diferencia entre cambiar de sistema de referencia espacio temporal, procedimiento usual, útil y lícito, a modificar sus propiedades cambiando la métrica.

No debemos extrañarnos, entonces, que en la Teoría General de Relatividad no se cumplan ni los Principios Universales ni la Relatividad Especial, dado que la métrica (*espacio curvo*) es dependiente de la distribución de materia. Más aún, ninguna ley relativista en el espacio de Minkowski es válida en la Teoría General, y ello incluye al Electromagnetismo de Maxwell. En este sentido digamos que hay una discusión centenaria respecto de la validez de la mal denominada [Paradoja de Born](#), sobre que un electrón en movimiento hiperbólico no irradia en el espacio curvo de la Teoría General y si lo hace en el espacio de Minkowski de la Teoría de Maxwell.

Este tema puede ser profundizado con los siguientes trabajos:

- 1 - A. Logunov ("*Curso de Teoría de la Relatividad y de la Gravitación*", Lecciones 1 y 2, 1998)
- 2 - N. Mermin ("*Relativity without light*", Am. J. Phys. 52 (2), 1984)
- 3 - S. Cacciatori, V. Gorini, A. Kamenshchik ("[*Special Relativity in the 21st century*](#)", 2008)
- 4 - Mitchell J. Feigenbaum ("[*The Theory of Relativity - Galileo's Child*](#)", 2008)

Hugo A. Fernández

hafernandez@fibertel.com.ar

Profesor Titular de Física Moderna
Universidad Tecnológica Nacional - Argentina