

Qué significa la Relatividad en la Física

Por GUILLERMO A. CALDERON

La teoría de la Relatividad, imaginada y desarrollada por el genio extraordinario del recientemente desaparecido profesor Alberto Einstein, parece ser el resultado de una serie de acontecimientos importantes en la historia del progreso humano en los diferentes campos del conocimiento, especialmente en el de las Ciencias Físico-matemáticas y la Filosofía natural.

Muchos descubrimientos altamente significativos ponían en evidencia la compleja configuración del mundo Físico y era imprescindible que se revisaran los fundamentos mismos de la Cosmología y la Física. Desde este punto de vista Einstein desempeñó un papel primordial, pues sus revolucionarias concepciones representan una adquisición incalculable en la cosección de esta finalidad, pues no solamente mostró nuevos derroteros al pensamiento científico, sino que el éxito alcanzado en sus trabajos es una verdadera reivindicación para los hombres de ciencia que se independizan de los viejos postulados para buscar la verdad con instrumentos nuevos.

Lancemos una rápida mirada retrospectiva sobre los descubrimientos más sobresalientes que se relacionan con la constitución íntima de la materia y por consiguiente los que interesan a la física moderna, hasta el momento en que apareció la Teoría de la Relatividad.

El atomismo, como teoría no ya especulativa sino netamente científica, se inicia con los trabajos de Maxwell y Boltzman, hacia 1860, sobre la teoría cinética de los gases; pocos años después el propio Maxwell dio a conocer su teoría sobre los campos electromagnéticos y la naturaleza electromagnética de la luz y formulaba sus famosas ecuaciones estructurales que dieron realidad física a la noción de campo energético (espacio donde se manifiesta una fuerza cualquiera; por ejemplo alrededor de un imán hay un campo de fuerza, alrededor de la tierra también, puesto que los objetos son atraídos). Este hecho re-

presenta un avance considerable hacia la Física Relativista. Posteriormente Herz evidenció experimentalmente la existencia del campo electromagnético. Mientras tanto Crookes experimentaba con los rayos catódicos demostrando la existencia de corpúsculos eléctricos. Más tarde (1895), Lorentz abordó directamente los nexos entre la luz y la materia y Röntgen descubría los rayos X; dos años más tarde J. J. Thomson encontraba el verdadero carácter de los fenómenos radioactivos. Estos descubrimientos tuvieron un antecedente indiscutible: las relaciones entre la electricidad y el magnetismo halladas por los célebres físicos Oersted y Faraday.

Todos estos hechos nos muestran entonces como la última mitad del siglo XIX fue una era feliz para las ciencias físico-químicas. En cuanto a las matemáticas puras, las realizaciones al finalizar este siglo eran también prodigiosas, fruto de la labor constante de hombres perseverantes y esforzados que desde los tiempos más antiguos contribuyeron en mayor o menor grado al desenvolvimiento de estas ciencias, desde Thales de Mileto y Apolonio hasta Riemann, Levi Civita y Gauss.

Era pues esta la situación en los albores del siglo XX; estaba preparado el terreno para la gran revolución representada especialmente en dos hombres: Max Planck con su Mecánica Cuántica en el campo del Microcosmos, en la cual se conciben la materia y la energía como magnitudes discontinuas, y Alberto Einstein que nos describe un Universo tetradimensional en que materia y energía son la misma cosa bajo distintas apariencias.

En las líneas que siguen me propongo únicamente hacer un sencillo bosquejo a grandes rasgos sobre la teoría de la Relatividad, limitándome a lo fundamental de ella, absteniéndome por completo de expresiones matemáticas.

El término Relatividad con que Einstein bautizó sus teorías, se debe a que en ellas se elimina la idea de absolutismo que se atribuye a ciertos conceptos en la Mecánica Clásica o Prerrelativista, especialmente al Espacio y al Tiempo. Según aquélla el Espacio o extensión dentro de la cual se hallan todos los seres materiales, tiene propiedades perfectamente definidas por la geometría euclidiana o geometría ordinaria de tres dimensiones, y ella es suficiente para determinar la situación de cualquier acontecimiento que ocurra en cualquier lugar del Universo. La noción de tiempo para el físico prerrelativista es una

simple sucesión de la cual nos damos cuenta observando el desarrollo de los fenómenos naturales, unos después de otros, sin relación con las condiciones espaciales del acontecimiento, es decir, la marcha de un reloj no se altera por el sólo hecho de trasladarlo de un sitio a otro del Universo; por consiguiente el Tiempo y el Espacio son entes perfectamente independientes a pesar de que es necesario contar con ellos en el desenvolvimiento de cualquier fenómeno físico.

El físico relativista por el contrario, no concibe la independencia entre estas dos nociones sino una interdependencia entre ellas, hasta el punto, que para explicarse todos los fenómenos físicos debe considerarlos dentro de una realidad física o continuo espacio-tiempo, o sea que encuentra una relación íntima entre el Espacio y el Tiempo para cada hecho particular, el cual es relativo a este conjunto. Para determinar un punto en el continuo Espacio-Tiempo son insuficientes, por supuesto, las tres dimensiones de la geometría euclidiana, pues la magnitud temporal exige una nueva coordenada y es necesario entonces prescindir del sistema galileano de tres coordenadas y establecer el sistema espacio-temporal de cuatro. Aquí radica la compleja estructura matemática que interviene en el desarrollo de estas teorías. Según este criterio un punto dentro del sistema tetradimensional no es otra cosa que un suceso, y si dos o más sucesos se verifican en un mismo lugar y en el mismo instante es porque coinciden sus puntos en el sistema mencionado. Esto no significa sin embargo, como muchos creen, que la coordenada temporal se pueda identificar con las espaciales; se complementan simplemente para constituir el sistema.

La física relativista gira en torno del concepto de movimiento y de acuerdo con ello se pueden distinguir dos etapas que fueron publicadas independientemente y en diferentes épocas por su autor; la Relatividad Especial o Restringida y la Relatividad Generalizada.

La Relatividad Restringida dada a conocer hacia 1906 se limita al análisis del movimiento uniforme rectilíneo, es decir, se concreta a los sistemas llamados inerciales, pues es sabido que cuando sobre un cuerpo no intervienen fuerzas externas, la inercia lo mantiene en ese estado de movimiento. Dos postulados sirven de fundamento a esta teoría:

1º Los fenómenos físicos referidos a un sistema inercial, cualquiera que sea, obedecen a las mismas leyes. Ningún fenómeno permite elegir, entre los infinitos sistemas inerciales, un sistema privilegia-

do para el cual valgan leyes que lo distinguan de los demás sistemas inerciales.

2º La velocidad de la luz, medida en cada sistema inercial, resulta idéntica para todos; esta velocidad no depende del estado de movimiento del foco luminoso.

El primer postulado nos indica entonces que resulta inútil practicar cualquier análisis en un sistema que no se halle dotado de aceleración con el fin de descubrir dicho movimiento y más aún si pretendemos determinar su velocidad, ya que las leyes de los fenómenos que se realicen en tal sistema son independientes de su estado de movimiento siendo este uniforme rectilíneo. Imaginemos un observador dentro de un vehículo en movimiento uniforme rectilíneo sin ningún contacto con el exterior y supongamos que ninguna causa externa le ponga de manifiesto si se mueve o no. El observador podrá opinar que se halla en reposo puesto que ningún experimento que realice allí dentro le indicará lo contrario; si le es permitido mirar al exterior podrá creer que los objetos que se encuentran fuera se mueven con relación a su sistema y no él con relación a ellos. Es más, puede imaginar que está en movimiento pero le queda imposible determinarlo. Recordemos aquí el error en que estaba Ptolomeo con el Geocentrismo y toda la humanidad antes de la aparición de Copérnico y Galileo; a partir de Newton y Kepler se conocen a la perfección los movimientos relativos de la Tierra con respecto al Sol, pero el Sol también se traslada con todo su sistema planetario, Dios sabe hacia dónde y en que forma. No se dispone en el Universo de un punto fijo de referencia, luego por este medio, tampoco se logrará jamás reconocer el movimiento absoluto.

El segundo postulado exige una comprobación más concreta, especialmente en lo que se refiere a la aseveración categórica de que al medir la velocidad de la luz en un sistema sin aceleración, sea en las más variadas condiciones, se debe encontrar el mismo valor numérico de esa velocidad. Este hecho resulta fundamental por cuanto el éter cósmico, medio sutil e imponderable que sirve de vehículo transmisor a la luz y a las ondas electromagnéticas, sostenido por largo tiempo por los físicos clásicos, queda abolido para los relativistas. En efecto, unos lo suponían fijo, lo cual era confirmado por el fenómeno llamado aberración de las estrellas, otros lo suponían arrastrado por los sistemas en movimiento, sin contar las contradicciones que se pre-

sentaron al descubrirse que las ondas electromagnéticas, incluso la luz, eran transversales. Pues bien: delicados e ingeniosísimos experimentos realizados entre los años de 1882 y 1887 por hombres de ciencia tan prestantes como Michelson, Morley y Fizeau y más tarde repetidos por muchos otros, han demostrado la exactitud del segundo postulado de la Relatividad Especial como también la inconsistencia del concepto del éter cósmico.

Otro concepto que desaparece al aceptar la teoría de la Relatividad es el de Simultaneidad por lo menos en un sentido absoluto. Si afirmamos que dos acontecimientos son simultáneos es porque han ocurrido en el mismo instante y por ende es indispensable que alguien los registre simultáneamente; no siendo esto posible en la generalidad de los casos dada la falta de señales instantáneas, debemos contentarnos simplemente con una simultaneidad relativa a los medios de comunicación utilizados y a otras circunstancias más o menos previsibles.

De los postulados anteriores y mediante la deducción matemática de alto análisis, especialmente el cálculo tensorial y la teoría de la invariancia y las transformaciones de Lorentz, se llega a varias conclusiones por demás importantes para la Física Moderna. Veamos algunas:

a) Solamente tiene realidad el conjunto Espacio-Tiempo y no las nociones de Espacio o de Tiempo tomadas aisladamente en la interpretación de la Naturaleza.

b) Ninguna velocidad puede exceder la de la Luz y por consiguiente es ésta una velocidad crítica.

c) La energía debe estar dotada de inercia y por consiguiente es simplemente una presentación diferente de la materia. Siendo la materia y la energía dos manifestaciones de la misma realidad física puede transformarse la una en la otra por procedimientos convenientes. Maxwell en sus ecuaciones geniales le había dado realidad física, a los campos de energía, y Einstein consigue demostrar matemáticamente que la materia es energía condensada y la energía materia diluida y deduce la equivalencia cuantitativa obteniendo la más famosa de sus fórmulas que se puede interpretar de la siguiente manera: entre la energía, medida en ergios, y la masa, medida en gramos de la cual se puede obtener por trasmutación, existe una relación constante e igual al cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío medida en centíme-

tros por segundo. Basta hacer un cálculo sencillo y se obtiene que un gramo masa de cualquier materia al ser íntegramente transformado en energía equivale a 25 millones de kilowatios-hora. Este hecho ha sido ya comprobado y ha resultado de inmensa importancia en las aplicaciones de la energía atómica, y por sí sólo basta para inmortalizar a su descubridor.

d) Las dimensiones de los cuerpos rígidos deben cambiar con la velocidad en el sentido del movimiento que los anima y, cuando la velocidad se hace igual a la de la luz la dimensión correspondiente debe desaparecer.

Según esta consecuencia, una esfera en movimiento aparecería primero como un elipsoide y al alcanzar la velocidad de la luz se presentaría como un círculo, sin espesor. Nuestras velocidades ordinarias son sin embargo insignificantes en comparación con la de la luz y resulta por lo tanto difícil apreciar esta variación; además al medir el cuerpo en movimiento, tanto el observador como los instrumentos de medida sufrirían en proporción el mismo cambio.

e) La masa de todo cuerpo en movimiento aumenta hasta hacerse infinita si este alcanza la velocidad de la luz. Además cuando un cuerpo adquiere o cede energía cambia su masa, contrariando en esta forma las leyes de Lavoisier y por lo tanto la masa de los cuerpos depende también de la temperatura.

f) No existe tiempo general y absoluto, sino tiempo local para cada sistema.

g) La mecánica de Newton y Galileo solamente representa una primera aproximación en la apreciación de las leyes más generales de la Naturaleza y, en consecuencia, sólo son válidas en casos particulares y locales.

h) Las leyes de los fenómenos electro-magnéticos deben constituir los fundamentos de la mecánica de la materia ya que la Física debe tender hacia la unidad y la simplicidad y no deben existir fenómenos que no se puedan explicar por leyes muy generales de la Naturaleza.

El último trabajo publicado por Einstein hace algunos años, confirma al menos teóricamente esta predicción. Efectivamente, en su teoría sobre el *Campo Unificado* no solamente destruye todas las barreras entre los campos y la materia, sino que establece leyes generales que abarcan todos los fenómenos electromagnéticos y gravitatorios y por consiguiente todos los fenómenos físicos, y las cuales

presenta en cuatro ecuaciones tensorales que son una prueba más del genio de su creador y que le dan una unidad pasmosa a la física contemporánea.

La teoría de la Relatividad Generalizada publicada por el mismo Einstein en 1913 se ocupa de los sistemas no inerciales, es decir, de aquellos que están dotados de aceleración, y al referirse al movimiento variado evidentemente queda incluido el fenómeno de la gravitación o sea la atracción mutua entre las masas cuyas leyes fueron expuestas genialmente por Newton dos siglos atrás, pero que Einstein aborda desde un punto de vista muy diferente en este lugar. Aquí tenemos precisamente la generalización de la teoría.

Amplía entonces su primer postulado de la Relatividad Especial y enuncia el siguiente: todos los sistemas de referencia son equivalentes para formular las leyes de la Naturaleza, las cuales pueden expresarse bajo una forma que no cambia, cualquiera que sea el sistema de referencia.

Al enfrentarse la Relatividad al problema de la gravitación fue necesario fijar la atención en un hecho que para los prerrelativistas no pasaba de ser una interesante coincidencia que se desprendía de las concepciones newtonianas: para cada cuerpo la masa inerte (que se opone al cambio de movimiento) es equivalente o al menos proporcional a la masa gravitante (peso); en el lenguaje matemático se podría expresar lo mismo diciendo: el producto de la aceleración por la masa inerte es igual al producto de la masa ponderal por la intensidad del campo de gravedad. La rigurosa comprobación de esto correspondió al físico húngaro Eötvös quien con tal fin realizó experimentos muy escrupulosos hacia el año de 1890. Partiendo de esta propiedad Einstein llega a una consecuencia extraordinaria y hasta extravagante para algunos, que llamó el Principio de Equivalencia, el cual se puede enunciar diciendo: existe equivalencia entre un campo de gravitación uniforme y una aceleración de conjunto del sistema de referencia, es decir, un campo homogéneo de gravitación, para todos los fenómenos físicos, es completamente equivalente a un campo inercial provocado por una aceleración rectilínea constante. Para explicarlo se sirve del siguiente ejemplo: imaginémonos una porción de espacio vacío, lo suficientemente alejado de cualquier masa material para que no existiendo allí campo de gravitación alguno encuentre aplicación la ley de la inercia. Un observador encerrado en una cámara

aislada no advertiría peso alguno ni dirección privilegiada. Si en tales circunstancias, alguien halase de una cuerda sujeta al techo con fuerza constante, la cámara adquiriría un movimiento uniformemente acelerado y al instante el hombre encerrado allí sería proyectado hacia la pared opuesta. A partir de este momento habría para él un abajo y un arriba, como en cualquier habitación sobre la tierra; al mismo tiempo podría comprobar que los objetos que se hallen dentro caerían con la misma aceleración. Su primera impresión sería entonces, que se halla en un campo de gravitación, suposición legítima puesto que todo se presenta como si tal ocurriera. Ahora bien, podemos suponer lo contrario: la cámara cayendo libremente, y sin rotación en el campo de gravitación de un astro; el peso quedará suprimido ya que todos los objetos estarán sometidos a la misma aceleración que la cámara y caerán con ella, tampoco allí habría parte superior ni inferior y el observador podría suponer un sistema de reposo sin campo de gravitación.

Del supuesto anterior se infiere una consecuencia única: no es dable establecer diferencia alguna entre un sistema animado de movimiento uniformemente acelerado y un sistema en reposo sometido a un campo de gravitación uniforme mediante el análisis de los fenómenos que ocurran dentro de él, lo cual confirma el Principio de Equivalencia; por consiguiente para formular las leyes de los fenómenos en un campo de gravitación basta conocerlas para un sistema de referencia uniformemente acelerado o a la inversa. Veamos otro ejemplo; si imaginamos la cabina de un ascensor elevado a velocidad constante y un rayo luminoso penetrando horizontalmente del exterior; durante el brevísimo tiempo que emplea la luz en atravesar la cabina, como ésta se mueve hacia arriba, para las personas que se encuentran en el interior, aparecerá el rayo desviándose hacia abajo; si el ascensor adquiere un movimiento acelerado es claro que la desviación del rayo de luz cambiará continuamente y aparecerá curvo. Esta consideración es aplicable a cualquier sistema acelerado y en virtud del Principio de Equivalencia a cualquier sistema en reposo bajo la acción de un campo de gravitación; luego la luz debe experimentar cierta curvatura al pasar por la vecindad de grandes masas como es v. gr. la del sol. Esta conclusión parece haber sido comprobada durante la observación de los eclipses solares de los años de 1919 y 1922.

La Relatividad generalizada, sirviéndose también de complejos recursos matemáticos tales como las coordenadas curvas de Gauss, llega

a conclusiones verdaderamente interesantes respecto de la conformación del Cosmos. Veamos algunas:

a) Todas las leyes físicas están basadas sobre la comprobación de coincidencias de dos o más sucesos en un mismo punto del espacio y en un mismo instante, o sea en un mismo punto del Universo Espacio-Tiempo, o en términos relativistas, son intersecciones de las líneas del Universo, independientes de todo sistema de coordenadas, por lo tanto, las leyes de la Naturaleza tienen una forma intrínseca independiente del sistema de referencia.

b) Como no existe en la Naturaleza ningún campo de gravitación rigurosamente uniforme, es imposible hallar un sistema de referencia donde la propagación de la luz sea isótropa y por consiguiente donde la ley de la inercia, tal como la concibieron Newton y Galileo, pueda verificarse rigurosamente; luego el Universo no puede ser euclídeo. Se llega sin embargo a la noción de un Universo esférico en el cual la luz debe circular en todas direcciones sin poder salir de él: "Un Universo finito pero ilimitado."

c) El movimiento de los cuerpos celestes no depende de la atracción sino de la intensidad del campo gravitatorio atravesado por ellos, campo determinado por la distribución de la materia en el Espacio. De esta conclusión se desprende una consecuencia importante, respaldada por la experiencia:

Las trayectorias elípticas que describen los planetas alrededor del Sol giran en su plano alrededor del centro de gravitación con velocidad constante (movimiento del Perihelio). Este fenómeno ha sido observado por notables astrónomos desde mucho tiempo atrás en la órbita de Mercurio, donde se hace sensible por la cercanía de este planeta al Sol; la rotación completa se estima que dura unos tres millones de años, y en los demás planetas es prácticamente insignificante. La Mecánica Clásica no había logrado explicar el fenómeno.

d) El ritmo de los relojes en cada sistema debe ser influido por el campo gravitatorio local. Se sigue de esta conclusión que en las grandes masas siderales debe disminuir la frecuencia de las vibraciones atómicas (las cuales podemos considerar como oscilaciones de reloj) y por consiguiente aumentar la longitud de onda de las ondas emitidas, de tal manera que en los espectros correspondientes las rayas específicas de un elemento cualquiera estarían corridas hacia el rojo. Este hecho ha sido comprobado experimentalmente al menos en principio.

Todas las deducciones de la teoría de la Relatividad han ido sometiéndose poco a poco a las pruebas experimentales de rigor excepto aquellas que por su naturaleza escapan a toda experiencia, como la obtención de las condiciones para el observador de la cámara alejada de cualquier otra materia, etc. Empero parece que la gran mayoría de los hombres de ciencia aceptan hoy día el relativismo como un legítimo avance en el terreno de las ciencias físicas y de la filosofía natural, y consideran que en lo que respecta a la simplificación y unificación de las leyes naturales la Relatividad presenta notables ventajas sobre las concepciones clásicas. Esto no significa, sin embargo, que se deban desechar de plano los principios y fórmulas de la Mecánica de Newton ya que en la mayoría de los casos resultan suficientes para determinar los fenómenos físicos; en la astronomía de nuestro sistema planetario, por ejemplo, dan resultados óptimos y a ello se debe el prodigioso adelanto de esta ciencia. La Mecánica clásica continuará teniendo vigencia, siempre que se trate de fenómenos cuya velocidad sea muy inferior a la de la luz y donde no intervengan campos de fuerza muy poderosos, además no en todos los casos resulta fácil geometrizar por completo el Universo.

