

NECESIDAD Y LÓGICA DE LA RELATIVIDAD

Carlos Sánchez del Río

1. Introducción

El objeto de este breve ensayo es exponer algunas reflexiones que justifican la teoría de la relatividad y algunas de sus consecuencias a partir de la dinámica de Newton sin recurrir al electromagnetismo ni a experimentos ópticos. Para ello me basaré en ideas muy generales relativas a la materia, al espacio y al tiempo junto con argumentos plausibles que inviten a aceptar los principios en que se basa la teoría de la relatividad propuesta por Einstein inicialmente en 1905 y completada en 1915.

La metodología que propongo se complementa con hechos de experiencia sin los cuales las consecuencias tal vez no serían creíbles. Esta manera de reflexionar sería aceptable dentro de una disciplina filosófica más amplia que la física y que podría denominarse *Metafísica de la materia*.

Es sabido que la relatividad supone alteraciones muy importantes de los conceptos clásicos del espacio, del tiempo, de la materia y de la energía. Las reflexiones que expongo en este ensayo prescinden del aspecto histórico y no pretenden sustituir a los métodos tradicionales de enseñar la relatividad. Más bien trato de dar un enfoque distinto al tema, que puede ser complementario para algunos lectores y quizás accesible por primera vez para otros. Quiero también señalar que la ausencia de fórmulas matemáticas se debe a dos motivos. El primero es ampliar el número de lectores interesados. El segundo es el carácter filosófico del ensayo que parece exigir el lenguaje natural.

2. La inercia.

El movimiento de objetos materiales es sin duda el fenómeno más visible y más frecuente de cuantos ocurren en la naturaleza. Y sorprende que durante milenios haya permanecido oculta la propiedad de la materia que nos permite entender el movimiento: *la inercia*. Incluso el insigne Aristóteles defendía que

en el mundo sublunar había dos clases de movimientos, los naturales y los violentos. Los primeros buscaban su sitio (el humo subía y las piedras caían). Los violentos, que eran todos los demás, necesitaban un motor. Desde aquellos lejanos tiempos de brillo del pensamiento griego pocos pensadores dudaron de la necesidad de un motor para impulsar un móvil. Y esos pocos con escasa convicción, hasta el punto de que en la escolástica tardía se afirmaba como verdad indiscutible que todo lo que se mueve, es movido por algo, *omne quod movetur, ab alio movetur*.

Esta arraigada creencia no fue puesta en duda hasta la llegada de la ciencia moderna en el siglo XVII. No sería exagerado afirmar que la propia ciencia moderna fue, en gran parte, consecuencia del descubrimiento de la inercia de la materia. No es extraño que la idea de que un objeto material se mueva sin cesar a menos que algo lo impida se aceptó muy lentamente a lo largo de los años. Se suele conceder a Galileo el mérito de haber sido el descubridor de la inercia en un caso particular. Dejando caer y subir bolas en planos lisos más o menos inclinados llegó a la conclusión de que una bola se movería sin parar en un plano horizontal si no hubiera rozamientos que lo impidieran. Más general es el principio enunciado por Newton en su primera ley de la dinámica: todo cuerpo permanece en reposo o en movimiento rectilíneo y uniforme a menos que actúe sobre él una fuerza que modifique su estado.

Antes de seguir adelante, es oportuno mencionar que la inercia es una propiedad general de la materia que se manifiesta en todos los movimientos que no sean impedidos de alguna manera. Una rueda ideal no frenada seguiría girando indefinidamente. Un vehículo ideal sobre carriles sin frotamientos también se movería sin cesar, aunque los carriles no fuesen rectos. No parece necesario poner más ejemplos. Cuando tratemos de la relatividad general veremos la importancia de reconocer el carácter tan amplio de la inercia.

El enunciado de Newton adolece de una cierta ambigüedad. No queda claro si el reposo del cuerpo es absoluto o se refiere al observador. Parece que a ambos porque Newton creía en un espacio absoluto que debería estar lleno de alguna materia sutil con respecto a la cual podría afirmarse o no el reposo de algo. No hay sin embargo razón alguna para pensar que tal espacio absoluto

exista. Lo más lógico es por tanto aceptar que el reposo absoluto no existe. El enunciado de Newton es tan válido para un observador “quieto” como para cualquier otro que se mueva en línea recta y con velocidad constante respecto de aquel. Técnicamente decimos que todos estos observadores se encuentran en *sistemas de referencia inerciales*. El enunciado de Newton del principio de la inercia constituye su primera ley de la dinámica que, como vemos, se cumple para todos los sistemas inerciales. Como no hay razón para que no se cumplan también las otras dos leyes, podemos concluir que las leyes de la dinámica son válidas en todos sistemas inerciales. Esto explica, por ejemplo, que dentro de un avión (que es un sistema inercial aproximado) ningún experimento mecánico nos permita distinguir si la aeronave se mueve o no.

3. La relatividad especial

Parece natural extender la validez que muestran las leyes de la dinámica en todos los sistemas inerciales a las demás leyes de la física. Es filosóficamente atractivo y no está en contradicción con nada de lo expuesto hasta aquí. Por otras razones relacionadas con el electromagnetismo, ya Einstein aceptó en 1905 la misma generalización y afirmó que todas las leyes de la física son idénticas en todos los sistemas inerciales. Esta proposición recibe el nombre de *principio de la relatividad especial*, o restringida, porque se limita a los sistemas inerciales. Tiene sin embargo consecuencias sorprendentes.

Para explicar el sistema planetario, el propio Newton propuso la *teoría de la gravitación universal*. Según esta teoría, dos cuerpos se atraen con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de su distancia ($F = m \cdot m' / r^2$). Pues bien, la aplicación de la tercera ley de Newton (*actio et reactio*) exige que la acción a distancia entre dos cuerpos sea instantánea. De no ser así, el valor de las fuerzas opuestas quedaría indefinido porque la distancia entre los cuerpos puede variar si están en movimiento.

La acción a distancia instantánea nos resulta inconcebible porque nada puede propagarse a velocidad infinita y porque es impensable que el Universo entero esté conectado de esta manera. Es preciso admitir que la citada acción a distancia se propaga con velocidad finita, aunque tal vez enorme. El problema

es que, si creemos en el principio de la relatividad, esta velocidad finita tiene que ser la misma en todos los sistemas inerciales porque si no fuera así algún sistema se podría distinguir de los demás. Esta conclusión lleva consigo las consecuencias que enseguida veremos. Nuestro razonamiento nada dice sobre cual ha de ser el valor de esta velocidad máxima pero lo natural es aceptar como tal la *velocidad de la luz en el vacío* puesto que no conocemos ninguna que sea más grande. En relación con esta cuestión hay que recordar que ya Einstein introdujo un postulado en este sentido al establecer que la velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas inerciales. Conviene señalar, sin embargo, que Einstein basó su postulado en el electromagnetismo y aquí aparece como consecuencia de la imposibilidad de la acción a distancia instantánea, que es un principio muy general.

Para analizar las consecuencias de haber aceptado la existencia de una velocidad máxima universal común en todos los sistemas inerciales conviene recurrir al modelo tradicional y pensar en una estación de ferrocarril y un tren que pasa con velocidad constante; son dos sistemas inerciales y por convenio podemos llamar “quieto” al de la estación y “móvil” al del tren. La intuición nos dice que si un pasajero camina dentro de un vagón su velocidad vista desde el tren es una, y vista desde la estación es otra. En cambio si lo que se desplaza es un destello luminoso su velocidad es la misma desde la estación que desde el tren. Es claro que algo raro pasa, por lo menos, con los relojes.

No es contrario a la lógica pensar que los relojes de la estación y del tren marchen a ritmos distintos aunque ambos relojes sean iguales. Si el reloj móvil fuera más deprisa que el quieto, al aumentar la velocidad del tren el ritmo del reloj podría llegar a ser infinito lo que parece inaceptable. En cambio si el reloj móvil fuera más despacio que el quieto, al aumentar la velocidad del tren marcharía cada vez más lento hasta llegar a pararse, lo cual no parece que sea rechazable. Si se acepta que esto último es lo que sucede, resulta válido el siguiente razonamiento. Si los dos relojes empiezan a funcionar cuando se produce un destello de luz, poco tiempo después el reloj quieto de la estación marcará un tiempo mayor que el reloj móvil del tren y, como la velocidad de la luz es la misma, la luz habrá recorrido un espacio menor en el tren que en la estación. Dicho de otro modo, la velocidad de la luz es la misma en un sistema

“quieto” que en uno “móvil” porque en este último el reloj va más despacio (dilatación del tiempo) y la luz recorre un espacio menor (contracción del espacio). Estos dos efectos ocurren siempre que se pasa de un sistema inercial a otro y por eso está justificado el concepto de *espacio-tiempo* como más propio de la realidad relativista que los de espacio y tiempo separados.

Todo lo anterior sería una fantasía si no fuera porque la dilatación del tiempo puede comprobarse experimentalmente. Como el efecto es pequeño necesitamos un reloj que se mueva a una velocidad próxima a la de la luz en el vacío. Un “reloj” adecuado es un muón. El muón es una partícula, de la familia de los leptones, que se desintegra en un electrón y dos neutrinos y cuya vida media, en reposo, es de unos 2.2 microsegundos.

Los rayos cósmicos primarios, que inciden sobre nuestro planeta, producen gran cantidad de partículas entre las cuales los muones rapidísimos son las más penetrantes y llegan a la superficie terrestre en cantidad muy superior a la prevista si se hubieran desintegrado en vuelo al mismo ritmo que los muones en reposo. Esto prueba que el “mecanismo” responsable de la desintegración de los muones muy rápidos va más lento que cuando los mismos están en reposo. Experimentos llevados a cabo con muones y otras partículas que se producen en aceleradores, confirman que los “relojes” móviles van más despacio que los que permanecen en reposo.

Otra propiedad de la materia que también queda afectada por la teoría de la relatividad es la masa de los cuerpos. Esta magnitud es de difícil definición como prueba el fracaso de Newton que se limitó a decir que la masa es la cantidad de materia pero que no se mide por lo que abulta sino multiplicando su volumen por la densidad (?). No es ésta la ocasión para analizar tan difícil problema dentro de la dinámica. Nos bastará con aceptar la segunda ley de Newton ($F=m \cdot a$) y admitir que medimos la fuerza por algún efecto estático como puede ser la deformación de un cuerpo elástico. De este modo, la masa de un cuerpo es un índice de la resistencia del cuerpo a cambiar su velocidad.

Recordemos ahora que hemos admitido que existe una velocidad máxima para la acción a distancia que es la de propagación de la luz en el vacío. No hay motivos para pensar que la velocidad límite que pueda alcanzar un cuerpo

en movimiento haya de ser distinta. Esta presunción tiene sorprendentes consecuencias como vamos a ver. Una fuerza constante aplicada a un cuerpo, le produce una aceleración constante, inversamente proporcional a la masa, que le produciría un incremento de velocidad siempre creciente. Pero como esto no puede ocurrir porque hay una velocidad límite, hemos de admitir que la masa del cuerpo aumenta con la velocidad a un ritmo tal que frene el incremento de la velocidad para que nunca alcance la de la luz en el vacío. Este cambio de la masa con la velocidad ha sido comprobado en múltiples situaciones. Basta recordar que hay que tener en cuenta este efecto para calcular las trayectorias de los electrones en los microscopios electrónicos. Lo mismo sucede en todos los aceleradores de partículas de alta energía.

Pero no es esto todo. En el proceso de aceleración que consideramos, la fuerza efectúa un trabajo que cada vez contribuye menos al incremento de la velocidad del cuerpo móvil. Y si la energía ha de conservarse, tendrá que acumularse en lo único que cambia mucho cuando la velocidad cambia poco, es decir en la masa. Este es un caso especial de la equivalencia entre el aumento (o mengua) de la masa de un sistema material y la mengua (o aumento) de la energía que acumula en su interior. Esto es lo que significa la célebre fórmula de Einstein $E=mc^2$ donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz en el vacío. La justificación de esta fórmula es muy sencilla. De acuerdo con el *Análisis dimensional*, esta energía debe ser, a menos de una constante, el producto de la masa por el cuadrado de la única velocidad que interviene en este caso. La constante puede determinarse recurriendo a la experiencia y resulta la unidad como vamos a ver.

Consideremos la *aniquilación* de un electrón (e^-) y un positrón (e^+) cuyas masas (m) son iguales y que tienen cargas eléctricas opuestas. Si se encuentran las dos partículas se forma un sistema cuántico, llamado positronio, que en poco tiempo desaparece dando lugar a dos fotones iguales que se propagan en direcciones opuestas cuya energía es $mc^2=0.51$ MeV, siendo m la masa de cada electrón. Este es un ejemplo de un proceso drástico en el que toda la materia se convierte en luz de muy alta energía. Existe el proceso opuesto de *creación de pares* (e^+e^-) por un fotón cuya energía sea superior a $2mc^2$ ya que esta es la energía mínima del par en reposo. En otras reacciones nucleares el

efecto es menos llamativo porque solo una parte de la masa se convierte en energía que puede ser cinética o no. Pero hay que señalar que el fenómeno que comentamos es general. En una reacción química, por ejemplo, disminuye la masa si se desprende calor pero el efecto no se puede observar porque es muy pequeño.

4. La relatividad general

La teoría de la relatividad general presentada por Einstein en 1915 tenía por objeto superar las limitaciones de la teoría especial que tan solo se refiere a los sistemas inerciales. La nueva teoría procede parcialmente de la siguiente reflexión. Imaginemos un conjunto de objetos en reposo vistos en un sistema inercial. Si pasamos a un sistema acelerado (no inercial) observaremos a los mismos objetos moviéndose con la misma aceleración en sentido contrario. Ahora bien, es característico de la gravedad que todos los cuerpos sometidos a ella, se mueven del mismo modo independientemente de sus masas. Por esta razón no podemos distinguir entre las dos situaciones, afirmación que se conoce como *principio de equivalencia*. Vemos, por tanto, que se puede anular localmente el efecto de la gravedad pasando a un sistema de referencia que se mueva con la aceleración de la gravedad. Esto sucede en el interior de un satélite artificial que está continuamente cayendo hacia la superficie terrestre aunque nunca llegue a alcanzarla. Conviene insistir en que la compensación solo es posible localmente porque no puede haber un sistema con varias aceleraciones a la vez para compensar la gravitación en lugares diferentes.

En relación con el satélite del párrafo anterior, vale la pena recordar lo que argumentaba Newton refiriéndose a la Luna. Si se dispara un proyectil desde una torre llega tanto más lejos cuanto mayor sea su velocidad inicial y si ésta es suficiente, nunca llegará al suelo porque la Tierra es redonda, de modo que el proyectil volverá al punto de partida para seguir dando vueltas a la Tierra indefinidamente. Newton supone, con acierto, que el movimiento del proyectil se compone de dos, uno en línea recta debido a la inercia y otro dirigido hacia el suelo que es causado por la fuerza gravitatoria que produce la Tierra.

Pero sucede que la explicación precedente se basa en la fuerza de la gravedad que es objetable porque implica una acción a distancia instantánea que ya hemos rechazado anteriormente. Cabe otra explicación diferente del movimiento del satélite si se recuerda que la inercia puede mantener sin parar movimientos no rectilíneos. Como ya se mencionó al tratar de la inercia, una rueda ideal no frenada podría girar sin detenerse nunca. Y en general cualquier punto material se movería por inercia sin cesar, a lo largo de una trayectoria no rectilínea predeterminada por algún agente que no impida su movimiento. En el caso del satélite, tal agente podría ser un campo que la materia terrestre crease en su entorno. Esta posibilidad evita la acción a distancia instantánea. Conviene señalar que en este caso, en lugar de la palabra *campo* se usa la expresión *espacio curvo*. Y no sin motivo.

Antes de continuar nuestro razonamiento, conviene hacer un inciso con objeto de recordar algunas expresiones que se utilizan en el dominio de los *espacios curvos*. Consideremos en primer lugar una línea recta que hemos dibujado en un papel. Decimos que representa un *espacio plano de una dimensión* porque basta un número para fijar la posición de cualquier punto de la recta por su distancia a otro que tomamos como origen de coordenadas. Si dibujamos ahora una línea curva diremos que representa un *espacio curvo de una dimensión*. Si la curva es cerrada tenemos un espacio unidimensional que es a la vez finito e ilimitado. Veamos a continuación el caso siguiente El papel representa un *espacio plano de dos dimensiones* porque bastan dos números para fijar un punto. En este espacio, la menor distancia entre dos puntos es la longitud de la recta que pasa por ambos. La superficie de una esfera, sirve de ejemplo de un *espacio curvo de dos dimensiones* porque bastan dos números para fijar un punto. En la esfera terrestre los números son los valores de los ángulos que indican la longitud y la latitud. En este caso la distancia más corta entre dos puntos no es una recta sino una curva llamada *geodésica* que es la menor distancia sobre la superficie. Otro ejemplo de espacio curvo de dos dimensiones es la superficie de un tubo recto o curvo o incluso cerrado, formando un toro. El espacio ordinario en que vivimos es un *espacio plano de tres dimensiones* porque podemos asignar tres números a cada punto. Es el espacio que nos resulta intuitivamente familiar. Por extensión de los casos

anteriores, los matemáticos definen las propiedades de *espacios curvos de tres dimensiones* que, por desgracia, no somos capaces de visualizar. Del mismo modo existen espacios planos o curvos de cuatro o más dimensiones. La *Geometría diferencial* se ocupa de definir la métrica y de determinar las curvaturas de estos espacios.

Terminado este inciso geométrico, volvamos a la posibilidad apuntada de sustituir la *Teoría de la Gravitación* de Newton por una *Teoría Relativista* para evitar la acción a distancia instantánea. La idea es admitir que la materia viene acompañada de un espacio curvo tal que un punto material se mueva por inercia a lo largo de una geodésica de dicho espacio. Si la teoría ha de ser relativista es preciso imponer que el citado espacio sea un *espacio-tiempo* como el que hemos encontrado en la relatividad especial. Será un espacio de cuatro dimensiones (x, y, z, ct) y, por coherencia habrá que definir la materia por la *energía-impulso* también relativista (mc^2, mv_x, mv_y, mv_z) . Einstein resolvió el problema brillantemente relacionando un tensor asociado con la curvatura del espacio-tiempo y el tensor energía-impulso de la materia. El resultado es un conjunto de ecuaciones diferenciales que determinan la métrica del espacio curvo buscado. Son ecuaciones de muy difícil tratamiento pero su solución ha mostrado la superioridad de esta teoría relativista de la gravitación como lo prueban las acertadas predicciones no anticipadas por la teoría de Newton.

Las primeras predicciones comprobadas fueron tres. La primera fue el lento desplazamiento del perihelio del planeta Mercurio que había sido un enigma durante casi un siglo. La segunda predicción fue la desviación de un rayo de luz al pasar muy cerca del Sol donde el efecto de la gravedad es más intenso; se comprobó en un eclipse. Finalmente la tercera predicción fue el corrimiento gravitacional hacia el rojo de los espectros luminosos que se ha comprobado en el campo gravitatorio terrestre.

Durante muchos años estas pruebas bastaron para satisfacer a los pocos estudiosos que se ocupaban de la relatividad. A partir de los años sesenta del pasado siglo, sin embargo, el florecimiento de la *Astrofísica* observacional renovó el interés por la Relatividad General que dio lugar a nuevos éxitos de la teoría. Cabe citar entre ellos la explicación de la existencia de los agujeros

negros, de las estrellas de neutrones y de las ondas gravitacionales emitidas por estrellas binarias orbitantes. Para terminar, hay que mencionar la enorme importancia de la relatividad en la moderna *Cosmología* aunque en el avance de esta disciplina tengan también gran importancia la *Termodinámica*, la *Mecánica cuántica* y la *Física de partículas*.

5. Conclusiones

Las reflexiones que hemos expuesto en lenguaje natural y utilizando una metodología atípica nos sugieren dos observaciones que no siempre aparecen en las presentaciones usuales de la Teoría de la Relatividad.

En primer lugar queda probado que se puede enseñar la relatividad sin recurrir al éter como objetivación de un espacio absoluto, ni al experimento de Michelson y Morley para refutarlo, ni a las ecuaciones de Maxwell para justificar la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío. Para evitar tales prolegómenos es preciso insistir en la importancia del descubrimiento de la inercia como propiedad esencial de la materia y desterrar la creencia tradicional que se resumía en la sentencia *omne quod movetur ab alio movetuvetur* que debe ser sustituida por *motus manet*, afirmación más breve pero verdadera.

La segunda observación es que el presente ensayo muestra con especial claridad que las dos teorías de Einstein forman un todo a pesar de los años transcurridos entre 1905 y 1915. Y es así porque en esta exposición de la relatividad la gravedad juega un papel crucial tanto en la teoría especial como en la general. Además el *espacio-tiempo* que es un elemento descriptivo superior de los procesos naturales aparece ya como plausible en la teoría especial aunque no fue introducido hasta 1908 por Minkowski.

A pesar de estas observaciones es comprensible que la metodología de este ensayo no agrade a quienes prefieren no recurrir a la experiencia a menos que sea imprescindible.