

RELATIVIDAD Y RELATIVISMO EN LA CIENCIA

Rufino Lecea Blanco

IES La Laboral, Lardero (La Rioja)

rufino.lecea@gmail.com

RESUMEN. Contra el relativismo de Thomas Kuhn, que explica la historia de la ciencia como una sustitución de unos paradigmas por otros por medio de revoluciones, se defiende aquí la tesis de que la ciencia es ciencia matemática: la ciencia progresa profundizando y generalizando principios matemáticos. Como ejemplo se analiza el principio de relatividad de Galileo que no es refutado, sino completado y ampliado por la teoría de la relatividad especial de Einstein (1905), la cual es a su vez completada y ampliada por la teoría de la relatividad general del mismo autor (1915).

ABSTRACT. Against Thomas Kuhn's relativism, which explains the history of science as a substitution of paradigms through revolutions, it is defended here the thesis that science is mathematical science, i. e., it progresses by deepening and generalizing mathematical principles. As an example, we analyze Galileo's principle of relativity that is not refuted but completed and expanded by Einstein's theory of special relativity (1905), which is in turn completed and expanded by the same author's theory of general relativity (1915).

1. EL RELATIVISMO COTIDIANO: RELATIVIDAD Y RELATIVISMO

Entre la multitud de citas falsamente atribuidas a Einstein hay una especialmente falsa: "Como dijo Einstein, todo es relativo".

Es cierto que el relativismo es una postura ampliamente defendida entre la gente, a menudo sin una mayor reflexión y muchas veces con la mejor de las intenciones, queriendo mostrar tolerancia y comprensión hacia el otro. En apoyo de tal posición suelen pronunciarse refranes como el de Ramón de Campoamor: «*En este mundo traidor / nada es verdad ni mentira / todo es según el color / del cristal con que se mira*». Y así no es extraño que se apele a la autoridad de Einstein, uno de los mayores científicos de todos los tiempos, buscando el prestigio para una opinión que quiere acallar lo más pronto posible la réplica y la discusión.

El relativista cotidiano aprovecha la ambigüedad inherente a la palabra "relatividad" para llevar el agua a su molino y declarar que la célebre teoría de Einstein está de su lado. Lo cual no es extraño, pues el relativista, al partir del presupuesto de que todo vale, no hay cosa que ame más que jugar con el significado equívoco de las palabras del lenguaje para dar aire a su ceremonia de la confusión. El error del relativista cotidiano se nutre de la polisemia de las palabras del lenguaje,

pues cuando afirma que todo es relativo, el significado de la palabra “relativo” nada tiene que ver con el utilizado por Einstein al establecer que el tiempo es “relativo” a la velocidad del espectador.

Sin embargo, y este es el problema, la posición relativista no es exclusiva de la irreflexión cotidiana, también la encontramos en el campo de la filosofía e incluso en el de la filosofía de la ciencia, es el caso de pensadores como Kuhn y Feyerabend. Paul Feyerabend representa un relativismo extremo para la ciencia. Muy pocos científicos defenderían tal relativismo que, como todos los relativismos, se autorrefuta, pues nadie puede coherentemente afirmar que no existe la verdad. Así, la frase “nada es verdad” ¿habrá de ser verdadera o no?

Por otra parte, el relativismo moderado de Thomas Kuhn ha recibido una calurosa acogida tanto entre los científicos como entre los filósofos de la ciencia. Aunque de un modo más sofisticado, el relativismo de Kuhn participa del mismo juego de la anfibia de la lengua para contribuir a enturbiar unas aguas que han sido previamente declaradas turbias. Dejando aparte, por el momento, la propuesta de Feyerabend, nos centraremos en el relativismo de Thomas Kuhn.

2. EL RELATIVISMO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA: LA “INCONMENSURABILIDAD”

En 1962, Thomas Kuhn, en su obra *La estructura de las revoluciones científicas*, introdujo el concepto de *inconmensurabilidad*, para atacar “la concepción heredada” de la ciencia. Según esta concepción, la ciencia es un sistema de conocimiento verdadero y acumulativo. Kuhn va a cuestionar no solo el carácter acumulativo del conocimiento científico sino también la verdad universal del mismo, afirmando que dos teorías (o mejor, *paradigmas*) científicas sucesivas son inconmensurables, es decir, que no hay un lenguaje teórico común que permita compararlas.

El término *inconmensurabilidad* es tomado por Kuhn de las matemáticas, donde se aplica a la relación entre dos magnitudes para las cuales falta una unidad común de medida. Este es el caso de la relación entre la diagonal y el lado de un cuadrado. Como es sabido desde los pitagóricos, dado un cuadrado de lado la unidad, no es posible expresar la medida de la diagonal como fracción de dos números naturales, es decir, no hay un número *racional* que exprese la . Ahora bien, sería un error concluir que, puesto que no hay *razón* (fracción) que exprese la diagonal de un cuadrado de lado la unidad, entonces las matemáticas contienen algo *irracional* en su seno.

Que no exista un número racional que permita medir la diagonal de un cuadrado en relación a su lado, no quiere decir que no se pueda medir, pues de hecho la medida es . Hay magnitudes como  o como π que no se dejan atrapar por los números racionales y que demandan otro tipo de unidades. No debemos aprovechar las ambigüedades del lenguaje para sacar conclusiones precipitadas. Al decir que  es irracional, no se está realizando ningún ataque a la razón (como capacidad esencial del ser humano) sino tan solo constatando la limitación de los números racionales (números expresables como la fracción de dos números naturales). Por tanto, la inconmensurabilidad en matemáticas no significa imposibilidad de *comparar* dos magnitudes, sino solo imposibilidad de *expresar* la comparación como fracción o suma finita de fracciones.

El error de Kuhn consiste en tomar prestado desde las matemáticas el término inconmensurabilidad¹ para aplicarlo a la filosofía de la ciencia, significando ahora imposibilidad de

¹ La evolución del concepto de inconmensurabilidad a lo largo del pensamiento de Thomas Kuhn muestra lo problemático de defender un relativismo, bien que moderado, para la historia de la ciencia. Kuhn, en reformulaciones sucesivas, fue redefiniendo la noción de inconmensurabilidad. Primero con carácter semántico (años 70): dos teorías no son completamente traducibles una a la otra, se carece de un lenguaje neutral, no hay posible traducción sin pérdida. Posteriormente con carácter taxonómico (años 80):

comparar dos teorías científicas (o paradigmas científicos) rivales. Que dos teorías científicas son incomparables quiere decir en Kuhn que no disponemos de un lenguaje neutro que permita la comparación de las consecuencias empíricas de dos teorías científicas rivales. La consecuencia inmediata es que el conocimiento científico no es acumulable, las revoluciones en la ciencia muestran que no hay progreso constante en el conocimiento. Así, por ejemplo, para Kuhn el paradigma aristotélico (universo cerrado y geocéntrico) es incomparable con el paradigma moderno (universo abierto y heliocéntrico). Entre ambos se ha producido una revolución científica, que ha permitido sustituir el primer paradigma por el segundo.

3. EL NACIMIENTO DE LA CIENCIA MODERNA: LA “REVOLUCIÓN” CIENTÍFICA

A partir de la noción de inconmensurabilidad Thomas Kuhn elabora el concepto de revolución científica (ciencia normal- anomalía- crisis- revolución- nueva ciencia normal) entendida como sustitución de un viejo paradigma científico por otro nuevo. Particularmente el concepto de revolución científica está extraído y aplicado a la revolución copernicana.

Ahora bien, al tomar la revolución copernicana como modelo de toda revolución científica, Thomas Kuhn está presuponiendo lo que se pretende demostrar: que dos paradigmas científicos son inconmensurables, que no hay criterios científicos empíricos que permitan preferir a uno sobre otro. Y esto es esencialmente cierto cuando nos centramos en el paradigma ptolemaico y el copernicano, pero no es así cuando comparamos el paradigma aristotélico y el galileano. En el primer caso (Ptolomeo vs. Copérnico) no hay criterios científicos (empíricos) que nos permitan preferir a uno sobre otro. Ambos paradigmas son científicamente inconmensurables, por ello la preferencia sobre uno u otro depende de criterios no científicos sino sociológicos (o históricos, teológicos, metafísicos, incluso psicológicos). No hay revolución científica entre Ptolomeo y Copérnico, tan solo hay una revolución sociológica. De hecho, no hay experimento físico que permita discernir si es el Sol quien se mueve en torno a la Tierra o si es la Tierra la que se mueve en torno al Sol, no hay sistema de coordenadas (Tierra, Sol) absoluto. Esto es precisamente lo que expresa el principio de relatividad de Galileo. Cualquier sistema de referencia es *relativo*.

La auténtica revolución científica no la proporciona Copérnico frente a Ptolomeo, sino Galileo frente a Aristóteles: la revolución científica es la sustitución de la física aristotélica por algo completamente novedoso, por la física matemática, la única que puede ser llamada con toda propiedad *ciencia*. La revolución científica no consiste meramente en sustituir el paradigma ptolemaico y geocéntrico por el paradigma copernicano y heliocéntrico, sino sustituir la ciencia aristotélica (cualitativa) por la ciencia moderna de Galileo (cuantitativa, matemática).

Aristóteles entendió la ciencia como algo *cualitativo*, refiriéndonos con cualitativo a lo que tiene que ver con la *esencia* de la cosa (más que con el accidente de la cualidad). La piedra cae porque es piedra, porque la esencia o naturaleza de la piedra es ser pesada, grave; mientras que el aire es ligero y por eso asciende por encima de la tierra o del agua. Cuando Aristóteles se pregunta por la causa de los cambios en la naturaleza, la respuesta la encuentra en la esencia de la cosa. Lo permanente bajo los cambios es la esencia.

Por el contrario, para Galileo la ciencia es *cuantitativa*, o mejor, matemática: la piedra cae porque posee cierta cantidad de materia que se halla en relación (cuantitativa, matemática) con otras cantidades de materia. La ciencia moderna, al igual que la ciencia aristotélica, busca también lo permanente, pero ya no como una esencia (cualidad) que permanece bajo los cambios, sino como leyes que gobiernan los cambios (cuantitativos) en la naturaleza.

inconmensurabilidad como imposibilidad de homologar las estructuras taxonómicas de dos teorías, es decir, cualquier traducción es necesariamente incompleta.

Galileo comprendió con meridiana claridad que la ciencia de la naturaleza ha de ser matemática, que la naturaleza es matematizable. Así lo expresa en sus *Cartas copernicanas* según la moda teológica propia de la época: ‘Las matemáticas son el lenguaje en el que Dios ha escrito el universo’.

Esta matematización de la física es la esencia de la ciencia moderna. En matemáticas no hay referencias absolutas: un punto del espacio solo puede ser definido en referencia (en *relación*) a otros puntos del espacio, un número no es otra cosa que una referencia (una *relación*) a otros números. La física moderna, la física matemática, se erige sobre esta misma idea tomada de la matemática: en la naturaleza no hay referencias absolutas. Así lo expresa el principio de relatividad de Galileo: en física no hay sistemas de referencia absolutos. *Dos sistemas de referencia en movimiento relativo de traslación rectilínea uniforme son equivalentes desde el punto de vista mecánico; es decir, los experimentos mecánicos se desarrollan de igual manera en ambos, y las leyes de la mecánica son las mismas.*

Este principio lo desarrolla Galileo al profundizar en su defensa del sistema copernicano, pero en puridad no ofrece argumentos *a favor* del movimiento de la Tierra, sino *en contra* de quienes niegan su movimiento: no podemos hacer ningún experimento sobre la Tierra ni para demostrar su movimiento ni para demostrar su quietud.

Galileo está generalizando para la física los principios de la matemática. Galileo no es el primero que lo hace, antes de él Eudoxo, Arquímedes, Ptolomeo, Copérnico... y tantos otros ya habían iniciado este camino. Pero sí es Galileo quien parece comprender el primero, la necesidad de matematizar la física para hacer de la física una ciencia “segura” (como dirá Kant).

La ecuación de la caída de graves de Galileo expresa esta idea de que el lenguaje de la matemática es el lenguaje de la física: el espacio que recorre un grave en caída libre es directamente proporcional al cuadrado del tiempo que dura la caída. La velocidad (también la aceleración) es una relación (matemática) espacio-temporal, no una cualidad del grave que cae:

$$s = \frac{1}{2} g t^2$$

En esta fórmula matematizada, no aparece para nada el peso de la piedra, ni ninguna cualidad de la misma. La constante de proporcionalidad, k , tiene un valor desconocido para Galileo, pero que resultará ser la mitad de la constante de la aceleración gravitatoria universal, la cual será determinada para la superficie de la tierra, a partir del experimento de Cavendish, como

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Si en matemáticas encontramos ecuaciones que expresan la conservación de la cantidad pura a ambos lados del signo igual, en la física moderna encontramos leyes que expresan la conservación de la cantidad de materia, de la cantidad de movimiento, de la energía, conservación de la presión-volumen-temperatura en los gases...

Descartes continúa esta matematización universal (*mathesis universalis*) y aporta su propio principio de conservación de cantidades, expresado como conservación de la cantidad de movimiento:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

Newton construye el sistema de la mecánica, conocido hoy como mecánica clásica o mecánica newtoniana, ejemplificado en la ley de gravitación universal.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Lo cual quiere decir que dos cuerpos cualesquiera se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de sus distancias.

La ley de gravitación universal unifica fenómenos aparentemente tan distintos como la caída de los objetos sobre la Tierra, el movimiento de la Luna y de los planetas o las mareas.

Newton demostró matemáticamente que un planeta sometido a una fuerza del tipo inversamente proporcional al cuadrado de la distancia habría de moverse según una elipse. Es la atracción gravitatoria del Sol sobre los planetas lo que mantiene a estos en sus órbitas. Igualmente, es la masa de la Tierra lo que hace girar a la Luna en su órbita y lo que obliga a caer sobre la superficie de la Tierra en movimiento uniformemente acelerado a los graves. No sólo a partir de la ley de gravitación universal eran explicables las leyes de Kepler sobre los planetas, sino también las leyes galileanas del movimiento de graves y proyectiles.

Todos los fenómenos celestes y terrestres quedaban definitivamente unificados en una ley universal matematizada. Esto supuso el reconocimiento general del genio de Newton y el triunfo de su sistema de mecánica.

Había nacido la ciencia moderna, la ciencia matematizable. Esta es *la* revolución científica, la revolución de Galileo. La antigua *ciencia* (si se le puede llamar así) aristotélica, cualitativa, quedaba definitivamente atrás. Sí hay criterios científicos (experimentos físicos) que nos permiten preferir la ciencia galileana a la ciencia aristotélica, la galileana es objetivamente superior. Por el contrario, no existe revolución *científica* (aunque sí sociológica) entre Ptolomeo y Copérnico. La ciencia moderna, de acuerdo con el ideal matemático, afirma que no hay sistema de coordenadas absoluto, cualquier sistema de referencia es relativo.

4. LA MECÁNICA NEWTONIANA: “CIENCIA NORMAL”

Una vez lanzada *la* revolución científica (galileana), la ciencia iba a conseguir en el lapso de unos pocos años (de 1638, *Discorsi* de Galileo, a 1687, *Principia* de Newton) un desarrollo extraordinario, quedando constituido así un periodo de lo que Kuhn denominaría “ciencia normal” que iba a durar hasta finales del siglo XIX.

Sin embargo, siendo considerado Newton uno de los mayores científicos de todos los tiempos (si no el mayor), debemos tener cuidado al analizar su propia exposición de su método científico, pues una cosa es la aportación científica de Newton y otra muy distinta sus propuestas metodológicas (su filosofía de la ciencia, diríamos hoy). Por una parte, la física newtoniana va a profundizar y ampliar el principio de matematización de la naturaleza y en concreto el principio de relatividad galileano que nace de la esencia misma de la matemática: no hay sistema de coordenadas absoluto en matemáticas y tampoco en física. Por otra parte, las propuestas metodológicas de Newton van a introducir supuestos metafísicos y teológicos en aras de encontrar referencias absolutas en la naturaleza. El resultado son el espacio y el tiempo absolutos newtonianos.

En el “Escolio General” del libro III de *Principia* Newton presenta la distinción entre movimiento absoluto y movimiento relativo. El primero es verdadero y matemático, y solo se puede cambiar al imprimirle una fuerza. El segundo es aparente y vulgar, y se puede cambiar si se cambian los cuerpos con los cuales se relaciona. De aquí nace su concepción del espacio y del tiempo absolutos, que Newton llega a identificar como una especie de *sensorio divino*, el órgano sensorial a través del cual Dios percibe el universo e interactúa con la materia. Naturalmente, tal hipótesis no es mecánica, sino metafísica y hasta teológica: jamás hubiera llegado a ella de mantenerse fiel al principio de relatividad galileano.

En las “Reglas del Filosofar” del mismo libro III de *Principia*, además de plantear el postulado de regularidad y simplicidad de la naturaleza (la naturaleza es simple, no hace nada en vano) y la ley de continuidad (las mismas leyes han de ser válidas para cualquier parte del universo), Newton expone el principio de inducción y su prohibición de las hipótesis (*hypotheses*

non fingo). Estas dos últimas reglas metodológicas de Newton no concuerdan en absoluto con su práctica científica. Por ejemplo, deduce (no por inducción, por tanto) la ley de gravitación universal de las leyes de Kepler y propone hipótesis de todo tipo, tanto matemáticas (como las empleadas por Galileo y Descartes) como metafísicas (espacio y tiempo absolutos).

El espacio y el tiempo son en Newton hipótesis metafísicas (más allá de lo físico), pues por inducción sólo se puede llegar al espacio y tiempo relativos. Newton viola sus propias reglas metodológicas. El espacio absoluto e infinito es la hipótesis base, en él se desplazan masas inertes que se mueven por una fuerza extrínseca que actúa sobre los cuerpos.

Esta clara incoherencia entre la física de Newton y su metodología no impedirá que sobre él se construya el sistema denominado mecánica newtoniana o mecánica clásica, que permanecerá sin discusión como sistema de la ciencia durante los siglos XVIII y XIX. El descubrimiento de Neptuno se presentará como uno de sus mayores refrendos: la fe ciega en la teoría es tan grande que la aparición de aberraciones en la órbita de Urano no puede deberse sino a un fenómeno todavía oculto, un nuevo planeta todavía desconocido.

Sin embargo, la hipótesis del espacio y del tiempo absoluto sigue siendo una hipótesis metafísica y, como tal, extraña al modelo físico-matemático de la ciencia moderna. Tarde o temprano tenía tal hipótesis que ser eliminada provocando una *revolución* en la ciencia. Pero, ¿una revolución científica o tan solo una revolución sociológica (en las creencias que acompañan a la ciencia)?

5. EL EXPERIMENTO MICHELSON-MORLEY: “CRISIS” EN LA MECÁNICA CLÁSICA

La teoría electromagnética desarrollada por Maxwell parecía exigir un medio a través del cual se propagara la luz, y este había de ser el éter luminífero que podía ser identificado con el espacio absoluto de Newton. Sin embargo, este éter o espacio absoluto permaneció como una hipótesis que nadie había conseguido medir.

En 1881, Michelson, primero en Potsdam (Berlín) y luego junto con Morley en 1887 en Cleveland (Ohio), ideó un experimento para medir la velocidad relativa de la Tierra respecto al éter. De acuerdo con el principio de relatividad de Galileo, se trataba de lanzar un rayo de luz en distintas direcciones y medir su velocidad (la velocidad de la luz sería distinta cuando el rayo luminoso fuera lanzado “a favor” del movimiento de la Tierra que cuando fuera lanzado “en contra”). Si la Tierra se desplaza respecto al éter, un rayo de luz lanzado desde la Tierra en distintas direcciones deberá alcanzar distinta velocidad al sumarse o restarse la velocidad de la Tierra a la velocidad de la luz. La dificultad residía en medir la enorme velocidad de la luz ($c = 300.000 \text{ km/s}$) y la relativamente baja velocidad de la Tierra (30 km/s).

La misma dificultad constituyó la clave de la solución al desafío: utilizar la propia luz como vara de medida. Puesto que la luz era considerada una onda, la longitud de la onda iba a ser la unidad de medida de la velocidad de la Tierra respecto al espacio absoluto. El principio es ingenioso y simple: una onda que rebota y vuelve deberá provocar interferencias en la propia onda, interferencias que serán distintas según la velocidad a la que regresa la onda. Para medir estas interferencias construyeron su “interferómetro”, un enorme aparato con brazos de hasta once metros que ensayaron primero en Berlín y luego en Cleveland.

Sin embargo el experimento resultó, aparentemente, un fracaso porque la velocidad de la luz era constante en todas las direcciones. Dada la confianza en la precisión del aparato de medida, no quedaba más remedio que aceptar que la luz violaba el principio de relatividad de Galileo.

En conclusión, la luz parece constituir un fenómeno curioso dentro del universo. La velocidad de la luz es constante: 299.792'7 Km/s en el vacío. No depende de la velocidad de la fuente luminosa. Si atraviesa un medio más denso, al salir recupera de nuevo su velocidad.

6. LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN: LA “REVOLUCIÓN” RELATIVISTA

6.1. La teoría de la relatividad especial

La respuesta de Einstein al problema abierto con el experimento de Michelson-Morley es la formulación de la Teoría de la Relatividad Especial (1905): no hay sistema de coordenadas absoluto, o dicho de otra manera, el espacio y el tiempo son relativos a la velocidad del sistema de referencia, siendo la velocidad de la luz una constante universal absoluta.

Esta respuesta no es la destitución del principio de relatividad de Galileo, sino todo lo contrario. Supone, al mismo tiempo, una profundización y ampliación en el principio de relatividad de Galileo, y una supresión de los elementos espurios (es decir, no matemáticos) presentes en Newton.

Imaginémonos un tren que marcha a una velocidad de 240.000 Km/s (es el llamado *tren de Einstein*). Un pasajero en el interior del tren envía un rayo de luz desde el suelo hasta el techo del vagón, ahí un espejo refleja la luz de nuevo hacia la linterna. El pasajero observa una trayectoria vertical de ascenso y descenso y mide el tiempo que transcurre. Sin embargo, para el jefe de estación situado en el andén, este mismo fenómeno se le ofrece muy distinto. En el tiempo que tarda el rayo de luz en recorrer el camino desde la linterna hasta el espejo, este último, debido al movimiento del tren, se desplazará. Y mientras el rayo retorna, la bombilla de la linterna se desplazará otro tanto. Para el observador del andén la luz ha recorrido una distancia mayor que para el observador del vagón. Para el pasajero la luz recorre una línea recta vertical de ascenso y descenso, el cateto del triángulo, mientras que para el jefe de estación la luz ha efectuado una trayectoria diagonal, la hipotenusa del triángulo. Supongamos que el jefe de estación mide el tiempo que tarda el rayo de luz en tal recorrido y que obtiene 10 segundos.

Ahora bien, la velocidad de la luz es absoluta, invariable y la misma para todo observador, como quedó demostrado en el experimento de Michelson-Morley. Y las trayectorias recorridas por la luz son distintas. La única conclusión posible es entonces que entre el envío y el regreso del rayo de luz en el andén transcurrió un tiempo mayor que en el interior del vagón del tren.

Un sencillo cálculo con ayuda del teorema de Pitágoras nos permite obtener que, mientras para el jefe de estación transcurrieron 10 segundos, para el pasajero sólo han pasado 6 segundos.

Por consiguiente, hemos de concluir, con Einstein, que tanto el tiempo como el espacio son relativos. El resultado de cualquier medición depende del estado de movimiento del observador. No existe un tiempo único absoluto, sino dependiente de la velocidad del sistema en que tiene lugar la medición. En un móvil, el tiempo transcurre más lentamente para el observador según aumenta su velocidad, hasta llegar a ser nulo al alcanzar la velocidad de la luz.

En muy poco tiempo la teoría de la relatividad especial fue aceptada por los físicos y los matemáticos y fue precisamente el matemático de origen ruso Hermann Minkowski, antiguo profesor de Einstein en Zurich, quien le confirió a la teoría la forma geométrica con que hoy la conocemos. Tiempo y espacio forman un continuo tetradimensional inextricable. No hay reposo ni movimiento absolutos. Los objetos se reducen al aumentar la velocidad (Contracción de FitzGerald). Un objeto a la velocidad de la luz tendría una longitud nula. Paralelamente, los objetos aumentan de masa al aumentar la velocidad (Postulado de Lorenz). Un objeto a la

velocidad de la luz tendría una masa infinita. La masa se puede convertir en energía, de acuerdo con la célebre fórmula deducida por Einstein a partir de las ecuaciones de transformación Lorentz:



Si Lavoisier estableció el principio de conservación de la masa, Einstein está proponiendo el principio de conservación de la masa-energía, con el cual se inicia la era de la energía atómica. Siguiendo el modelo matemático, la física moderna establece la conservación de cantidades en la naturaleza (de masa, de energía, de masa-energía...), lo mismo que una ecuación matemática expone la conservación de cantidades puras.

En suma, la teoría de la relatividad especial pulveriza los elementos metafísicos introducidos en la mecánica newtoniana, liberándola de creencias metafísicas o teológicas que la acompañaban y devolviendo la ciencia (la ciencia moderna) a sus raíces matemáticas. En mecánica no hay sistemas de referencia absolutos. Ahora el geocentrismo es tan válido como el heliocentrismo. Hemos vuelto a Galileo y su principio de relatividad. La velocidad de la luz es una constante universal. Mientras las contracciones y aumentos de masa son reversibles, el tiempo es irreversible (acumulativo), la velocidad de la luz no puede ser superada. Por esto es posible el viaje al futuro, pero no al pasado. Curiosamente, el siguiente paso en este proceso de matematizar la física, de profundizar en el principio de relatividad de Galileo, habría de venir en muy poco tiempo de la mano del propio Einstein.

6.2. Teoría de la Relatividad General (1915)

La teoría de la relatividad especial ha conseguido conciliar la gravedad newtoniana con el electromagnetismo de Maxwell (interacción entre partículas con carga eléctrica), pero todavía hay ciertos aspectos de la teoría de la relatividad especial que no encajan con la ley de la gravedad de Newton. Las leyes de gravitación newtonianas consideran que la fuerza de la gravedad es una acción a distancia instantánea, lo cual es inconsistente con la propia teoría de la relatividad especial, que considera la luz como velocidad máxima del universo, una constante universal.

En este caso va a ser un experimento mental, el experimento del ascensor, el desencadenante de la investigación de Einstein hacia la teoría de la relatividad general.

Imaginemos, primero, un observador encerrado en un ascensor en caída libre (sin resistencia del aire), los objetos que suelta flotan con él sin “caer” hacia el suelo. En segundo lugar, imaginamos ese ascensor en medio del espacio interestelar (sin atracción gravitatoria) que es arrastrado “hacia arriba” por una fuerza constante (aceleración) a , ahora los objetos “caen” hacia el suelo. En el primer caso es imposible comprobar para el observador si el ascensor se encuentra cayendo hacia el suelo en la Tierra o “parado” flotando en el espacio exterior. Para el segundo caso, el observador tampoco puede determinar ahora si el ascensor se encuentra posado sobre la Tierra o arrastrado por aquella fuerza en el espacio intergaláctico.

A partir de este experimento Einstein concluyó su *principio de equivalencia*: no hay ningún experimento físico que permita distinguir entre la acción de la gravedad y la acción de una fuerza constante tirando “hacia arriba”, luego gravedad y aceleración son equivalentes.

La teoría de la relatividad especial es aplicable a sistemas en movimiento uniforme y rectilíneo (inerciales), la teoría de la relatividad general es válida para cualquier sistema, incluidos los sistemas acelerados (la gravedad es una aceleración). En otras palabras, la teoría de la relatividad general es una extensión de la teoría especial de la relatividad hacia los campos gravitatorios, es una teoría de la gravedad general que reemplaza a la gravedad especial

(newtoniana), aunque continúa coincidiendo con esta para campos gravitatorios débiles y “pequeñas” velocidades.

La teoría de la relatividad pulveriza ciertas preconcepciones que se habían mantenido desde Newton, en concreto la identificación del espacio físico (absoluto) con el espacio euclídeo. Einstein postula que el espacio físico es un espacio no-euclídeo: geometría curva de ángulos obtusos, la distancia más corta entre dos puntos no es la línea recta, la suma de los ángulos de un triángulo mide más de dos rectos, no es posible trazar ninguna paralela a una recta dada (Riemann). De tal modo, el espacio y el tiempo forman un continuo tetradimensional (las tres dimensiones del espacio más otra del tiempo), finito e ilimitado (igual que no habría límites para el habitante bidimensional de una superficie esférica), y no-uniforme (el espacio se curva según las masas que lo constituyen, espacio protuberante hinchándose y deshinchándose). En palabras de John Wheeler: “El espacio-tiempo le dice a la materia cómo moverse; la materia le dice al espacio-tiempo cómo debe curvarse”.

Las ecuaciones de Einstein son la formulación precisa en lenguaje matemático de la relación entre la geometría del espacio-tiempo y las propiedades de la materia.



donde G es una cantidad geométrica denominada Tensor de Einstein, G es la Constante de Gravitación Universal, T mide el contenido de materia.

La ecuación transforma cantidades físicas (materia, gravedad, velocidad de la luz) en unidades puramente geométricas. La gravitación puede ser explicada newtoniana o einsteinianamente (la masa es una curvatura del espacio que obliga a combarse la luz que atraviesa la región). Así, puede entenderse que la ecuación de Einstein incorpora la gravitación newtoniana para darle un sentido más general, geométrico.

La ecuación de Einstein determina un conjunto de 10 funciones que pueden reducirse a 6 ecuaciones físicas (de ahí que usualmente se hable de “las ecuaciones de Einstein”, en plural). Las soluciones a estas ecuaciones nos describirán una onda gravitacional, la medida de la expansión del universo o incluso el espacio-tiempo plano descrito por la relatividad especial.

De nuevo, la teoría de la relatividad general es una teoría más general que incluye como un caso especial a la teoría de la relatividad especial, la cual a su vez incluye dentro de sí la teoría de la gravedad de Newton como un caso especial.

6.3. Tres pruebas experimentales de la teoría de la relatividad general

Una teoría científica no debe conformarse con dar una explicación de los fenómenos naturales ya conocidos o incluso inexplicados por teorías anteriores, si realmente la teoría quiere ser progresiva respecto a su antecesora debe ser capaz de realizar predicciones comprobables experimentalmente. La teoría de la gravedad de Newton fue aceptada unánimemente durante los siglos XVIII y XIX por ofrecer una explicación exacta de los movimientos de los planetas y por predecir incluso la existencia de planetas hasta entonces desconocidos, como es el caso del descubrimiento del planeta Neptuno por el astrónomo Galle (1846) a partir de los cálculos de Adams y Leverrier (1845).

6.3.1. La precesión del perihelio de Mercurio

Sin embargo, la Mecánica newtoniana se mostraba incapaz de dar cuenta del fenómeno denominado “precesión del perihelio” de los planetas, “anomalía” descubierta para el planeta

Mercurio en 1849 por Leverrier (publicada en 1859), para la cual se llegó a proponer la existencia de un planeta más cercano al Sol y para el que se buscó el nombre de Vulcano.

De acuerdo con la gravedad newtoniana, la órbita de cualquier planeta en torno al Sol debe ser una elipse perfecta. Pero la teoría de la relatividad general de Einstein predice que tal elipse no es perfecta sino que el perihelio (punto más cercano del planeta al Sol) irá desplazándose poco a poco en torno al Sol. Este fenómeno se produce en todos los planetas aunque es más notable en los cercanos al Sol como Mercurio.

En 1898, Paul Gerber, un desconocido físico alemán, propuso una fórmula matemática para calcular la precesión de los planetas a partir de la teoría de la gravedad newtoniana pero considerando que la gravedad no era instantánea sino que se propagaba a la velocidad de la luz. Esta ley concuerda asombrosamente con la que propuso Einstein, de modo independiente, en 1915 y que se deriva de la teoría de relatividad general. De este modo, la teoría de Einstein da cuenta de un fenómeno ya conocido para el cual no había explicación dentro de la mecánica newtoniana.

6.3.2. La deflexión de la luz

De acuerdo con la teoría de la relatividad general, puesto que el espacio es curvado por la masa gravitatoria, la luz procedente de una estrella se curvará al pasar por la cercanía de un cuerpo muy masivo como es el Sol. En la teoría newtoniana la luz, al no tener masa, no resulta afectada por la gravedad, mientras que la teoría de Einstein predice que, observando la luz de una estrella que pasa cerca del Sol (lo cual puede experimentarse más fácilmente durante un eclipse solar), la posición aparente de la estrella variará respecto a su posición real. En 1919 una expedición dirigida por Arthur Eddington estudió el eclipse de Sol del 29 de mayo de ese año en el Atlántico sur y confirmó las predicciones de la teoría general de la relatividad de Einstein.

El éxito de esta predicción contribuyó a la aceptación universal de la teoría de Einstein y lo catapultó a él mismo como el científico más famoso de todos los tiempos.

6.3.3. El corrimiento gravitacional al rojo

El corrimiento gravitacional al rojo es una predicción de la teoría de la relatividad general que tardó en ser confirmada hasta 1959 por Pound y Rebka en el laboratorio Jefferson de la Universidad de Harvard. El fenómeno consiste en que un campo gravitacional, como el de la Tierra, debe provocar en un rayo de luz lanzado hacia arriba un corrimiento hacia el rojo (reduce la frecuencia), mientras que lanzado hacia abajo provocaría un corrimiento hacia el azul.

Otras confirmaciones experimentales de la teoría general de la relatividad han sido la predicción de la existencia de ondas gravitacionales, existencia de estrellas de neutrones y de agujeros negros, las lentes gravitacionales... El funcionamiento de los GPS (sistemas globales de posicionamiento por satélites artificiales) no podría entenderse sin tener en cuenta la teoría de la relatividad para la medición de distancias y posiciones.

De tal modo, después de repasar las dos versiones de la teoría de la relatividad, queda pendiente la cuestión de si es posible el progreso en la ciencia y en qué consiste. ¿Hay revoluciones en la ciencia que sustituyen los viejos paradigmas por otros nuevos que, a su vez, habrán de ser sustituidos en una nueva revolución? ¿O hay un progreso en la ciencia de modo que los nuevos conocimientos incluyen a los antiguos, pero no anulándolos sino perfeccionándolos al delimitarlos con exactitud en sus márgenes de referencia?

7. KANT Y LOS LÍMITES DE LA CIENCIA

La idea del progreso de la ciencia, frente a la propuesta de las revoluciones en la ciencia (Kuhn), no es nada nueva. Kant, por ejemplo, concibió la ciencia como un proceso indefinido de conocimiento, no exactamente en el sentido de un acercamiento indefinido a la verdad (Popper), sino como una acumulación indefinida de conocimientos verdaderos, que tiende a lo absoluto (el Ideal de la razón pura) a sabiendas de que nunca podrá alcanzar tal conocimiento absoluto. Este saber absoluto actúa para la ciencia como un horizonte que nunca se alcanza, que nunca puede ser alcanzado, pero que nos indica que debemos seguir avanzando.

En la *Dialéctica trascendental* Kant analiza el papel de la razón en su tendencia a unificar todo tipo de fenómenos buscando principios más generales en los que se puedan subsumir los conocimientos anteriores. Este proceder de la razón, señala Kant, es un proceder “por meros conceptos”, sin preocuparse de si los conceptos están unidos o no a una intuición, con lo cual este trabajo de la razón no tiene valor cognoscitivo, sino que es un mero “análisis” de conceptos. Es decir, ahora la razón no ofrece conocimientos nuevos sino que se limita a presentarlos ordenados al modo “silogístico”, haciendo que lo condicionado derive de su condición. En el caso de los fenómenos físicos, la ciencia avanza buscando principios y leyes cada vez más generales, que expliquen mayor número de fenómenos.

Así, en la física aristotélica, los fenómenos de los movimientos naturales (caída de graves y ascenso de ligeros) estaban explicados separadamente de los movimientos violentos (proyectiles). Galileo unificó ambos tipos de fenómenos con las leyes de su dinámica. Newton, a su vez, con la ley de gravitación universal, unifica los movimientos de los astros (Kepler) con los movimientos terrestres (Galileo). Nuevas leyes cada vez más generales unifican y explican cada vez mayor número de fenómenos.

Esta tendencia, natural en la razón, en busca de lo incondicionado, mientras se mantiene dentro de los límites de la experiencia, impulsa el avance de nuestro conocimiento. El error, advierte Kant, consiste en pretender haber realizado tal unificación absoluta, saltándose los límites de la propia razón, yendo más allá de la experiencia. Entonces surgen, en el terreno de los fenómenos físicos, las antinomias: dos tesis contradictorias entre sí pero ambas demostrables a partir de la idea de mundo como totalidad: que la materia es infinitamente divisible (Descartes) y que la materia está constituida por indivisibles (Newton), que el universo es finito en el espacio y en el tiempo y que el universo es infinito en el espacio y en el tiempo...

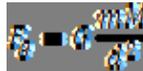
El *error* de Newton fue haber pretendido alcanzar el absoluto, y toda la mecánica clásica se construyó sobre este supuesto. Dado que la velocidad de la luz es muy alta, considerémosla como infinita, se dijeron. Lo mismo sucede en las antinomias kantianas: puesto que hasta ahora hemos dividido cualquier partícula de materia, enunciemos que la materia es infinitamente divisible; puesto que el universo es muy grande, afirmemos que es infinito: puesto que el universo es muy antiguo, digamos que es eterno. En todos estos casos, el error deriva de haber pretendido alcanzar un absoluto.

Pero el otro error sería afirmar que, puesto que no podemos alcanzar el absoluto, entonces todo es relativo, todo es subjetivo, todo vale.

La ciencia debe sortear tanto la Escala del absolutismo como la Caribdis del relativismo. La ciencia consiste en medir y medir cada vez con mayor exactitud. Este es el único progreso posible en la ciencia, matematizar cada vez mayores parcelas de la naturaleza y hacerlo cada vez de un modo más preciso. Nunca alcanzaremos la verdad absoluta y total, pero tampoco erraremos siempre por los mares de la ignorancia. Nuestro conocimiento conquista pequeños territorios de verdad y progresa ampliándolos y cartografiándolos mejor. Estas verdades de la ciencia ni son absolutas ni son provisionales, ni son irrefutables ni son convencionales: la verdad es simplemente la verdad.

Como es evidente, Kant, en la exposición del proceso de unificación de conocimientos por parte de la razón, se detiene en Newton, pero debemos entender que tal proceso ha de proseguir indefinidamente: nuevas teorías científicas presentarán cada vez leyes más generales que darán cuenta de cada vez mayor número de fenómenos, sin que en ningún momento podamos decir “hemos pisado el horizonte”, “ya lo sabemos todo”. El horizonte siempre está ante nuestros ojos, nunca bajo nuestros pies. Las nuevas leyes y teorías científicas no refutan a las antiguas, sino que las explican. Las nuevas leyes no son ni una nueva verdad provisional ni la verdad absoluta, son simplemente una verdad más exacta, más precisa que la anterior.

Cuando Newton unifica las leyes de Galileo sobre los movimientos terrestres y las de Kepler sobre los movimientos de los astros, ni está refutando a Galileo ni a Kepler, sino que está integrándolos en su teoría de gravitación universal. Es más, la ley



es el principio general del que se derivan las leyes del movimiento de graves y proyectiles de Galileo y las leyes del movimiento de los planetas de Kepler.

Cuando Einstein propone su teoría de la relatividad especial, no está refutando las leyes de la mecánica de Newton, sino explicándolas a partir de principios más generales que permitan su unificación con las leyes del electromagnetismo de Maxwell. El principio de la relatividad especial de Einstein no es más que la generalización del principio de relatividad de Galileo.

Cuando Einstein presenta la teoría de la relatividad general, está proponiendo una generalización de la teoría de la relatividad especial para sistemas de referencia acelerados (gravitacionales). Ni está refutando su teoría de la relatividad especial ni tampoco está refutando la mecánica clásica, sino desarrollando ambas en un marco más amplio y más general que incluya los sistemas acelerados como la gravitación².

Las leyes de la dinámica de Galileo, las leyes de Kepler, las leyes de Newton... y por supuesto las leyes de Einstein, siguen teniendo hoy la misma validez que en el momento en que fueron formuladas. Los estudiantes de Bachillerato y de Facultades y Escuelas Universitarias aprenden las leyes de Galileo y de Newton³, los ingenieros hoy construyen puentes, edificios y motores utilizando las leyes de la mecánica clásica y sería absurdo que alguien pretendiera diseñar un avión aplicando la teoría de la relatividad einsteiniana. Ahora bien, un satélite lanzado al espacio será un fracaso si no tiene en cuenta los principios de la relatividad de Einstein.

La diferencia entre la mecánica clásica y la relativista consiste simplemente en que la primera considera la velocidad de la luz como instantánea mientras que la segunda la considera una constante universal cuyo valor es $c = 300.00 \text{ km/s}$. Para experimentos, como sucede a nivel de la superficie terrestre, en que pueda despreciarse el valor de c y considerarlo como instantáneo, la mecánica clásica sigue siendo válida a todos los efectos. Por el contrario, para experimentos en el espacio exterior o con partículas subatómicas, es crucial tener un valor exacto de c . Por eso, la mecánica clásica sigue siendo válida hoy dentro de su marco de aplicación como son los fenómenos

² El físico Eduardo Battaner expone esta idea: “Algo me atrae en este principio [General de Relatividad de Einstein], y es que no es más que una generalización del Principio de Relatividad de Galileo [...]. Decía éste que ‘las leyes de la mecánica son las mismas para todo observador inercial’. Einstein, al enunciar el Principio de Relatividad Restringida, no hizo más que tachar una palabra de esta interesante frase. Tachó la palabra ‘Mecánica’: ‘Las leyes (de la Mecánica) son las mismas para todo observador inercial’. Y por lo que entiendo que es el Principio General de Relatividad, Einstein volvió a tachar la otra palabra superflua de la frase de Galileo. Tachó la palabra ‘inercial’: ‘Las leyes (de la Mecánica) son las mismas para todo observador (inercial)’”. BATTANER, E. (1988): *Física de las noches estrelladas*. Barcelona: Tusquets, p. 264-5.

³ Esto no sucede con la física aristotélica, la cual no es ciencia matemática y que sí fue refutada por Galileo y Kepler.

de la ingeniería terrestre (construcción de edificios, calzadas, puentes, motores...), mientras que cualquier experimento en el electromagnetismo fracasaría si se despreciara el valor preciso de c . En definitiva, la teoría de Einstein no refuta la mecánica clásica sino que la integra en una teoría más general que incluye la mecánica y el electromagnetismo.

¿Qué significa entonces el término “relatividad” en la ciencia, que estamos viendo utilizar con tanta frecuencia en Galileo, en Newton y en Einstein?

8. CONCLUSIONES: EL CONCEPTO DE RELATIVIDAD EN LA CIENCIA

El principio de relatividad galileano establece, como su propio enunciado indica, que en mecánica todo movimiento inercial es *relativo*, que no hay sistemas de referencia absolutos, y al mismo tiempo determina las ecuaciones que nos permiten *relacionar* un sistema con otro.

Téngase en cuenta que prohibir sistemas de referencia privilegiados no significa que ya no haya leyes en la dinámica (que todo valga), sino al contrario, es ahora cuando podemos comparar los resultados de los experimentos en un sistema con los de otro mediante las correspondientes ecuaciones de transformación. El relativismo einsteiniano no quiere decir que cualquier experimento esté bien realizado, sino que un experimento bien realizado en determinado laboratorio puede ser repetido, aplicando las oportunas ecuaciones de transformación, en cualquier otro laboratorio. Por el contrario, los experimentos que no son válidos en un laboratorio, no son válidos en ningún laboratorio.

Al oír ecos de la nueva teoría de la relatividad en la física, algunos filósofos de principios del siglo XX se apresuraron a corear el triunfo del relativismo, incluso en los ámbitos que, como el de la ciencia, tradicionalmente más se habían resistido. El más grave error de interpretación de la teoría de la relatividad resulta de entender ésta como un apoyo a que, no sólo en la vida cotidiana, sino incluso en la ciencia ‘todo es relativo’, ‘todo vale’. ‘Nada es verdad ni mentira, todo es del color del cristal con que se mira’ es una afirmación ampliamente extendida, pero no por ello menos peligrosa ni errónea.

Como ejemplo, podemos ver cómo L. Pearce Williams, en su *Introducción* a su selección de escritos sobre relatividad, afirma:

Sin embargo, la matematización de la naturaleza tenía también sus compensaciones, pues, al parecer, existía en las nuevas teorías de la relatividad una componente subjetiva nada despreciable. La realidad -parecía decir Einstein- depende del punto de vista de ‘cada cual’. Así, pues, en el arte, en la psicología, en la sociología y en otros campos, la teoría de la relatividad debería liberar al individuo de la tiranía de las leyes mecánicas y mecanicistas. (L. Pearce Williams, 1989, p. 13).

Naturalmente, nada está más lejos de una interpretación correcta de la teoría de la relatividad, esta teoría no libera de las “leyes mecánicas y mecanicistas” sino que establece los límites en los cuales estas leyes siguen siendo válidas. Las leyes de Einstein no quieren decir que todo es relativo; al contrario, el principio de relatividad podría llamarse principio de universalidad, ya que aunque las magnitudes físicas resulten ser relativas, las nuevas leyes físicas sí son universales y son ellas las que determinan universalmente para todo observador las ecuaciones de transformación de aquellas magnitudes ‘relativas’. Lo relativo es ahora menos relativo que nunca, ya que disponemos de ‘diccionarios’ que permiten traducir las magnitudes obtenidas en cualquier experimento en un determinado laboratorio a las magnitudes que se habrán de obtener en cualquier otro laboratorio. Pese a Kuhn, no hay revolución científica, ni en el paso de Newton a Einstein y mucho menos en el paso de la teoría de la relatividad especial a la general, puesto que estas teorías sí son conmensurables, y lo son empíricamente. Más que una revolución científica, lo que observamos es una profundización y ampliación de los principios matemáticos de la física. Sí han cambiado las

creencias extracientíficas, pero no los principios científicos. Las nuevas teorías científicas no refutan a las anteriores, sino que establecen el marco en que son válidas, establecen los límites de aplicabilidad de las viejas teorías.

BIBLIOGRAFÍA

- BATTANER, E. (1988): *Física de las noches estrelladas. Astrofísica, relatividad y cosmología*. Barcelona: Tusquets.
- EINSTEIN, A. (1931) [1917]: *Relativity: The Special and General Theory*. New York: Crown Publishers. (Trad. de R.W. Lawson).
- EINSTEIN, A. (1980): *Mi visión del mundo*. Barcelona: Tusquets. (trad. de S. Gallardo y M. Bübeck).
- EINSTEIN, A. et al. (1923): *The Principle of Relativity*. New York: Dover. (Trad. de W. Perrett y G.B. Jeffery).
- EINSTEIN, A. et al. (1968): *Relativity Theory: Its Origins and Impact on Modern Thought*. New York: John Willey and Sons Inc. (Selección de L. Pearce Williams). Trad. de M. Paredes Larrucea (1973): *La teoría de la relatividad: sus orígenes y su impacto sobre el pensamiento moderno*. Madrid: Alianza.
- EINSTEIN, A.; INFELD, L. (1938): *The Evolution of Physics*. New York: Simon and Schuster.
- HOFFMANN, B. (1983): *Relativity and its Roots*. New York and Oxford: W.H. Freeman and Co. Trad. de J. Llosa Carrasco (1985): *La relatividad y sus orígenes*. Barcelona: Labor.
- HOLTON, G. (1952): *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*. Revisada y ampliada por Stephen G. Brush. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. Trad. de J. Aguilar Peris (1984): *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. Barcelona: Reverté.
- LANDAU, L.; RUMER, Y. (1980): *¿Qué es la teoría de la relatividad?* Madrid: Akal.