

Horizontes abiertos por las Teorías de la Relatividad de Einstein

Francisco González de Posada

Como presentación de los fundamentales trabajos de Einstein de 1905, y que han constituido la denominada posteriormente “relatividad restringida o especial” y que se reproducen en versiones españolas en artículos consecuentes, se construye en este trabajo introductorio una organización elaborada de las principales ideas explícitas e implícitas en ellos y que, a mi juicio, constituyen las características novedosas, revolucionarias, de las teorías de la relatividad.

Estas ideas se clasifican históricamente. Primero, las correspondientes a la relatividad especial, distinguiendo las debidas a los artículos de 1905 de Einstein “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” y “¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?” y las debidas a Minkowski en 1908. Segundo, las correspondientes a la relatividad general de 1915.

Esta perspectiva global facilita una mejor comprensión de la relatividad especial cuyo centenario conmemoramos y que con un tratamiento directo exclusivo después de cien años sería tarea incompleta.

Con la voz *horizonte* designo tanto las ideas explícitas en los trabajos referidos como los trasfondos implícitos; las unas sugirieron nuevos caminos a la reflexión filosófica y a las concepciones físicas, los otros fueron transpareciendo progresivamente al avanzar el siglo XX. Unas y otros abrieron nuevos *horizontes* en el conocimiento de la Naturaleza, del Cosmos, de la Realidad.

I. *HORIZONTES ABIERTOS* POR LA RELATIVIDAD RESTRINGIDA O ESPECIAL (1905-1908)

I.1. *La tarea de Einstein (1905)*

1. A los efectos de nuestro principal interés actual, la revolución más descarada que introduce Einstein aquí (aunque podríamos decir, subrepticamente, suavemente) es la idea de la primacía de lo fenoménico, de la *dinamicidad*, sobre lo material constituido, cuestión que queda escondida bajo el

manto del conjunto del nuevo concepto de simultaneidad y de los dos postulados (que veremos en los próximos párrafos). Sugiero que se exprese como:

Horizonte (1): El Fenómeno precede a la Materia.

A mi juicio éste es el *trasfondo* más general y más determinante del pensamiento de Einstein, el más radical, que determinará, además, prácticamente toda la ciencia y la filosofía del siglo XX.

2. El *punto de partida* de la construcción intelectual de Einstein es un nuevo concepto de simultaneidad. En línea del horizonte anterior surge la idea de “evento” como unidad de “lugar-instante” frente a la unión disjunta de “lugar” e “instante” (puntos de los referentes espacio y tiempo radicalmente independientes desde Aristóteles pasando por la plena asunción de Newton hasta él).

La existencia de un “tiempo propio” de cada “evento” (en expresión clásica: fenómeno en un lugar y en un instante) introduce un nuevo concepto de simultaneidad, a los efectos de las medidas, que niega la realidad de un “tiempo absoluto” (verdadero, matemático, de validez universal).

Horizonte (2): La necesaria sustitución del “tiempo absoluto” por un “tiempo propio” de cada evento.

3. La teoría de la relatividad restringida de Einstein se funda en la consideración de dos postulados relativos a los fenómenos directamente en cuanto fenómenos.

El primero, *postulado de relatividad* o *Postulado R*, se refiere a la invariancia de las leyes de la Naturaleza: Las ecuaciones (leyes) de los fenómenos son idénticas (invariantes) respecto de los sistemas de coordenadas relativamente inerciales (independencia de las velocidades relativas en movimiento rectilíneo y uniforme entre sistemas de coordenadas asociados a objeto-fenómeno y observador).

Horizonte (3): Invariancia de las leyes respecto a sistemas en movimiento rectilíneo uniforme, que alumbra una relatividad esencial (de momento restringida) de la Naturaleza.

Se generalizaría en la Relatividad general, en 1915.

4. El segundo, *Postulado L*, se refiere a que la velocidad de la luz (de toda onda electromagnética), c , en el vacío: 1) es *constante* (referencia a lo

cuantitativo, algo de valor único, que resulta ser $\cong 300.000$ km/s); y 2) es *límite* de toda propagación, movimiento, información en el Universo.

De este modo se establece un principio “negativo” por el que todo movimiento, de velocidad v , ha de cumplir la condición: $v \leq c$.

Así se establece un nuevo *horizonte* de revolución:

Horizonte (4): La luz condiciona (casi es determinante de) el (funcionamiento del) Cosmos.

La luz se presenta, pues, como uno de los elementos codeterminantes del Cosmos (y no sólo la Gravitación, y más tarde la acción, h).

5. Como *consecuencias* del establecimiento de estos postulados, entre otras, pueden recordarse las siguientes.

PRIMERA. *Contracción de la longitud* (que afecta a la *métrica*: distancia entre puntos, longitud de un cuerpo; magnitud fundamental clásica) con la velocidad.

SEGUNDA. *Dilatación del tiempo* (deberíamos decir de la *duración*, que afecta a la *métrica*: intervalo tempóreo; magnitud fundamental clásica) con la velocidad. Supone el retraso de los relojes en movimiento respecto de los “en reposo”.

TERCERA. Variación de la masa con la velocidad:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

de modo que se establecerá otro nuevo horizonte:

Horizonte (5): La masa inercial (o cantidad de materia) pierde su condición de magnitud intrínseca para ser respectiva, dado que depende de la velocidad del cuerpo.

CUARTA. *Transmutación* (de algunas cantidades en determinadas condiciones) *masa-energía* en los dos sentidos:

$$E = mc^2 .$$

Horizonte (6): La masa inercial (o cantidad de materia) de un cuerpo depende de su contenido de energía.

Así la masa de un cuerpo es también respectiva con la energía que emite o absorbe.

I.2. La tarea complementaria de Minkowski (1908)

Newton había considerado al espacio como “absoluto, verdadero y matemático”. En su formalización matemática estas condiciones se expresan mediante el tensor métrico fundamental del espacio puntual euclídeo tridimensional:

$$G = [g_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

que expresa la métrica elemental

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

respecto de un sistema de coordenadas cartesianas triortonormales (que existen en el espacio “absoluto” de Newton). Y manifiesta su naturaleza de ser “idéntico en todas partes siempre”.

La concepción einsteiniana de 1905 se había limitado propiamente al movimiento y tenido en cuenta, de hecho, sólo las métricas asociadas a las longitudes y a las duraciones tal como he puntualizado previamente; es decir, en realidad no habían afectado a las concepciones del espacio y del tiempo como referenciales. Minkowski considera estas modificaciones métricas de las longitudes y las duraciones afectando a los *referenciales* espacio y tiempo newtonianos que quedan ahora asociados en un nuevo referencial único que denomina “Mundo absoluto”, espacio pseudoeuclídeo tetradimensional de tensor métrico o fundamental:

$$G = [g_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

que expresa la métrica elemental

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dt^2 .$$

Este “mundo absoluto” (geometría), distinto al newtoniano en dimensión (4 en vez de 3) y carácter (pseudoeuclídeo y no euclídeo) es, sin embargo, también “idéntico en todas partes siempre”, y en él se desarrolla, según Minkowski, la Física (existencia de cuerpos y fenómenos en/entre ellos).

Así:

Horizonte (7): Espacio y tiempo no son independientes, son subespacios ortogonales integrados en un espacio único tetradimensional pseudoeuclídeo de modo que sus métricas son respectivas.

Con este enfoque, estímulo y luz, se le abrirían a Einstein las puertas para la construcción de la Relatividad general.

II. HORIZONTES ABIERTOS POR LA RELATIVIDAD GENERAL (1915)

1. Einstein amplía los postulados anteriores de modo que como complemento de los expuestos de la relatividad restringida pueden sintetizarse de la forma siguiente:

PRIMERO. *Postulado L* (inalterable).

SEGUNDO. *Postulado R*: ahora general, es decir, con respecto a cualesquiera sistemas de referencia.

Horizonte (8): Invariancia de las leyes respecto a cualesquiera sistemas de referencia (relatividad general de la Naturaleza).

TERCERO. *Postulado de equivalencia*. La gravitación es equivalente a una aceleración, y carecería así de sentido la distinción entre las dos especies de masa —inercial, m_i , y gravitatoria, m_g —; es decir:

$$m_g = m_i$$

Horizonte (9): Gravitación e inercia son fenómenos de idéntica naturaleza

2. Las ecuaciones de campo

$$\underbrace{R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R}_{\text{Efecto}} = K \underbrace{T_{ij}}_{\text{Causa}}$$

pueden interpretarse en medida importante de manera clásica: existe una *causa*, la cantidad de masa-energía (tensor de impulsión-energía), que produce un *efecto*, el tensor métrico (geometría):

$$[g_{ij}] = \begin{bmatrix} g_{11}(u^k) & g_{12}(u^k) & g_{13}(u^k) & g_{14}(u^k) \\ g_{12}(u^k) & g_{22}(u^k) & g_{23}(u^k) & g_{24}(u^k) \\ g_{13}(u^k) & g_{23}(u^k) & g_{33}(u^k) & g_{34}(u^k) \\ g_{14}(u^k) & g_{24}(u^k) & g_{34}(u^k) & g_{44}(u^k) \end{bmatrix}; \quad i, j, k \in I_4$$

Pero esta geometría (la naturaleza métrica del espacio) puede estar “cambiando continuamente en todas partes”; es esencialmente variable (y además desconocida). Esta consideración lleva implícita otra revolución; un nuevo:

Horizonte (10): Supresión definitiva del carácter ‘fundamental’ de las ‘categorías fundamentales’ tradicionales de espacio, tiempo y materia.

De esta manera, de hecho, no se producirá sólo una *desfundamentación* sino una *descategorización*, una *desustantivación*.

Y otro aspecto capital de esta revolucionaria concepción abriría otro horizonte más:

Horizonte (11): Supresión de las acciones (gravitacionales) a distancia.

La gravitación no se concibe como fuerza que actúa a distancia sino como deformación del espacio-tiempo (que podría considerarse como actuación por contacto).

3. Con esta perspectiva, además, se establecen de hecho otros importantes nuevos horizontes revolucionarios.

La curvatura del espacio-tiempo, nueva explicación de la gravitación, hace al Universo finito.

Horizonte (12): El Cosmos es finito.

Y, finalmente, quizás el más importante:

Horizonte (13): El Cosmos se presenta como “un único TODO total” en funcionamiento (fenoménico) general.

Pero esta *dinamicidad intrínseca*, inherente a su formalización, la camufla inicialmente Einstein modificando artificialmente sus ecuaciones para imponer una estaticidad general. Sin embargo esta dinamicidad está ya, implícitamente, en plenitud.

4. Algunas consecuencias de interés relevante pueden expresarse con otras palabras tales como las siguientes.

PRIMERA. “La luz pesa” (geodésicas del espacio-tiempo).

SEGUNDA. La estructuración del *Universo como conjunción espacio-tiempo-materia*. Unidad métrica y referencial y con la materia.

TERCERA. *Respectividad* mutua de los conceptos de espacio, tiempo y materia que han dejado de ser entidades fundamentales (últimas, radicales, simples, primordiales, irreducibles, independientes) para ser respectivas.

III. NOTAS COMPLEMENTARIAS

PRIMERA. Con la intención expresa de citar al admirado maestro Ortega, aunque en este ámbito lógicamente hayamos de discrepar en demasía, recuerdo que el concepto de *horizonte* con el que designo el *trasfondo* intelectual (conceptual, filosófico) que *transparece* implícito o explícito con fuerza en las concepciones físicas y formalizaciones matemáticas soportes o asociadas, difiere notablemente del de *tendencias generales*, que utilizó Ortega en su ensayo sobre la Relatividad (1923: “El sentido histórico de la teoría de Einstein”, Apéndice en *El tema de nuestro tiempo*): “que han actuado en la invención de esta teoría”, “tendencias profundas que afloran en la teoría de la relatividad”. Éstas eran según él: 1º) absolutismo; 2º) perspectivismo; 3º) antiutopismo o antirracionalismo —tres tendencias que, por otra parte, en cuanto contenido, tienen poco que ver con nuestros anteriores *horizontes*— y 4º) finitismo —que sí es común—. Ortega busca —detecta— el *sentido histórico*, histórico-social, nosotros nos hemos referido a lo intrínseco revolucionario en el plano intelectual.

SEGUNDA. La relatividad presenta, desde su concepción hasta el presente, una deficiencia o insuficiencia puesta de manifiesto por su creador: no introduce el campo electromagnético.

TERCERA. Por otra parte, conviene recordar que la relatividad mantiene, desde los puntos de vista filosófico y matemático que aquí consideramos, la permanencia de otros *trasfondos*, quizás los más determinantes, comunes con los de la física clásica, que suponen la vigencia de unos *horizontes formales*, en los ámbitos filosófico y matemático, perfectamente concatenados, y ello

para las dos teorías de la relatividad -la restringida y la general-, y que pueden caracterizarse, en síntesis apretada, de la manera siguiente:

*Trasfondo (1): **Continuidad** (ámbito filosófico): expresada (ámbito matemático) mediante magnitudes físicas que se representan por variables continuas reales o funciones continuas reales de variable(s) real(es).*

*Trasfondo (2): **Determinismo causal** en los fenómenos naturales (ámbito filosófico): expresado (ámbito matemático) mediante leyes físicas relacionales de proporcionalidad (efecto-causa) generalizada.*

Por esto la Relatividad, a pesar de sus impresionantes aportes revolucionarios: a) no ha alcanzado plenamente la categoría de ‘nueva física’ (con la que sí se considera de ordinario a la física cuántica); y b) con cierta frecuencia se la considera también ‘clásica’.

*Catedrático de Fundamentos Físicos
Departamento de Física e Instalaciones Aplicadas
a la Edificación, al Medio Ambiente y al Urbanismo
Universidad Politécnica de Madrid
Avda Juan Herrera 4, 28040 Madrid
E-mail: fgposada@aq.upm.es*