

RELATIVIDAD GENERAL: ¿UNA TEORÍA CLÁSICA?

RAFAEL ANDRÉS ALEMAÑ BERENGUER

ABSTRACT: Herein it is put forwards the unusual features of General Relativity –compared with those ones in quantum physics- in order to discuss when and how a physical theory can be classified as “classical” or “non-classical”.

1. Introducción

Por una tradición que se remonta a los antiguos griegos, suele considerarse que la física genuina es aquella que se dedica a esclarecer la estructura elemental de la materia. Así, no es de extrañar que todas las teorías desarrolladas en este ámbito hayan venido a convertirse, más o menos declaradamente, en modelos a imitar por el resto de la física. El caso más patente a este respecto es el de la teoría cuántica. Inicialmente construida en torno a la década de 1920, y posteriormente enriquecida con una gran diversidad de formalismos equivalentes, la física cuántica no tardó en erigirse como la más exitosa de las teorías conocidas, tanto por su potencia predictiva como por la exactitud de sus contrastaciones. La radical divergencia entre gran parte de sus conceptos básicos y los de sus predecesoras, indujo a la mayoría de los físicos a establecer una clara línea de demarcación en su ciencia. A un lado se encontraban tanto la física cuántica genérica como las versiones cuánticas de las interacciones fundamentales (electrodinámica cuántica, teorías cuánticas de las fuerzas nucleares y, eventualmente, la gravitación cuántica), mientras que en el otro se situaba el resto de la física, etiquetada como “clásica” desde entonces.

Como es sabido, las teorías de la Relatividad de Einstein constituyó otro hito de la física del siglo XX que convulsionó –como la teoría cuántica- nuestra concepción del universo. La más elaborada de ambas, la Relatividad General, pese a su robusta coherencia interna y su poder abarcador, hubo de esperar hasta la década de 1960 para gozar de mejores confirmaciones experimentales que las logradas alrededor de 1919. La notable complejidad matemática de la teoría junto al hecho de que implicase una visión del cosmos sustancialmente distinta del resto de las teorías físicas (salvo la Relatividad Especial), se combinaron para mantenerla apartada como una pieza exótica dentro del arsenal teórico de los físicos. Para colmo, su resistencia a la cuantización por los procedimientos ordinarios, provocó que los físicos cuánticos la catalogasen como una teoría “clásica” más, e incluso más incómoda de lo habitual.

Sin embargo, una atenta mirada a las implicaciones de la Relatividad General –tomada sola o en conjunción con otras teorías- muestra que las ideas que de ella se deducen distan mucho de adaptarse a la visión de la naturaleza mantenida desde Newton hasta Maxwell y Lorentz, esa parte de la física que con mayor propiedad podría tildarse de “clásica”. El objetivo del presente artículo, pues, consiste en exponer esas peculiares características de la Relatividad General que, si bien no la aproximan a los planteamientos cuánticos, sí la distancian del cuerpo teórico dentro del cual se la ha querido forzosamente encorsetar.

2. El carácter de las teorías clásicas

Lo cierto es que existe tan escaso acuerdo sobre las características distintivas de la física clásica, como sobre aquellas que diferencian a la teoría cuántica del resto de la física. Para empezar, admitiremos que en la física que en adelante llamaremos “clásica” (desde la obra de Newton hasta los días previos a Einstein) concurren los siguientes aspectos:

- (1) El espacio y el tiempo, si bien indispensables para la construcción del mundo físico, se consideran entidades mutuamente independientes entre sí.
- (2) Asimismo, espacio y tiempo configuran un trasfondo absolutamente independiente de los acontecimientos físicos acaecidos en él. Constituyen, por así decirlo, el escenario donde se desarrollan los sucesos del mundo físico, pero sin influir ni verse influidos por ellos.
- (3) A cada suceso físico puede asignársele, en principio, una posición (dependiente del referencial) y un tiempo completa y unívocamente determinados.
- (4) Las leyes físicas establecen conexiones, también unívocas, entre unos sucesos y otros dentro de una perspectiva filosófica que se ha dado en llamar “determinismo”. Así, toda introducción de probabilidades se debe a la comodidad de evitar un nivel de estructura más profundo en el que aparecerían mecanismos causales que las harían innecesarias.
- (5) No hay una cota máxima en la velocidad de propagación de las interacciones físicas.
- (6) Existe una distinción bien nítida entre ciertos conceptos capitales –aun cuando se relacionen entre ellos mediante algunas fórmulas- como son la masa, la energía, el momento lineal, etc.

La lista precedente, aunque tentativa, puede servirnos como una útil guía para las discusiones posteriores. Con ese mismo propósito, a continuación procederemos a enumerar una serie de

peculiaridades de la física cuántica, tomadas en su mayoría de un estudio al respecto realizado por Mario Bunge [1]:

- (1) Se introducen variables físicas propias –como el espín, la extrañeza, la paridad, el “color” o el “sabor”- algunas de las cuales poseen analogías clásicas con diferente interpretación.
- (2) Aparecen probabilidades primarias o irreducibles (que no remiten a ningún subnivel determinista), y una estadística cuántica –la de Fermi-Dirac- con una hipótesis específica como es la exclusión de Pauli.
- (3) Inexistencia de conceptos como el de posición o el de trayectoria (y por ello, ausencia de una verdadera cinemática, excepto para valores promedio y en el límite clásico), debido al carácter peculiar de las entidades básicas de la teoría, los objetos cuánticos o *cuantones*, y no por efecto del observador.
- (4) Ecuaciones específicas del movimiento y de campo (sólo formalmente simulables en la física clásica), originadas por la naturaleza básicamente estocástica de la teoría.
- (5) Ausencia de separabilidad, o localidad, entre los componentes de un sistema, por más que estos se alejen espacialmente entre sí.

Prescindiremos aquí de referirnos a la supuestamente decisiva influencia del aparato de medida o de la conciencia del observador sobre el resultado de las mediciones en experimentos cuánticos, puesto que numerosos autores (Bunge [2], Margenau, [3], Popper [4], etc.) ya se han encargado de desmentirla. Y una vez hecho esto, proseguiremos en los sucesivos apartados examinando los rasgos de la Relatividad que la apartan del ámbito de la física clásica.

3. El papel del espacio y el tiempo

La Relatividad einsteniana en su conjunto, es la primera teoría en la que el espacio y el tiempo dejan de desempeñar la función de receptáculo pasivo típica de la física clásica (abreviada como FC), para convertirse en un entramado tetradimensional, el espacio-tiempo, susceptible de influir y ser influido por los procesos naturales. Esta concepción de un espacio y un tiempo separados, y ambos como telón de fondo inmutable del acontecer físico, es común tanto a la FC como a la teoría cuántica (FQ a partir de ahora).

Las posiciones y los tiempos de los sucesos físicos serán ahora relativos al sistema de referencia que se elija. Así ocurrirá con la relación de simultaneidad de dos acontecimientos, e incluso con

propiedades que se creían inherentes a los objetos y procesos físicos, como la longitud, la duración o el contenido energético. Será también la peculiar combinación del espacio y el tiempo en la teoría de la Relatividad la responsable de que exista una cota superior, la velocidad de la luz, c , en la transmisión de las señales físicas, algo desconocido en la FC y en la FQ.

Es más, en la Relatividad General (RG en adelante) los coeficientes del tensor métrico $g_{\mu\nu}$ - dependiente de la distribución local de materia-energía- se emplean para construir la conexión afín espacio-temporal, $\Gamma_{\eta\lambda}^{\delta}$, que a su vez determinará la clase de las trayectorias permisibles (las geodésicas) para las partículas libres. De este modo, la estructura del espacio-tiempo se ve modificada por el contenido energético, y viceversa, el comportamiento dinámico de la materia-energía local depende también de las características geométricas del espacio-tiempo en su vecindad.

Por lo tanto, la RG posee ecuaciones de un género exclusivamente típico de esta teoría, algo que no ocurre en la FQ. En efecto, las ecuaciones tensoriales de la RG que relacionan la métrica del espacio-tiempo con su contenido energético, no encuentran parangón en ninguna otra teoría de la FC. Esto, que otorga el sello característico a la teoría de Einstein, a la vez provoca su olímpico aislamiento respecto a las demás ramas de la física. Por el contrario, las ecuaciones funcionales que se presumen distintivas de la FQ, no son desconocidas en ciertos problemas de límites pertenecientes al electromagnetismo y a la mecánica de medios continuos.

La peculiar naturaleza no lineal de las ecuaciones de la RG permite además que las leyes del movimiento de las partículas libres (en otras palabras, la ecuación de las geodésicas) se hallen ya incorporadas en las propias ecuaciones de campo de la gravitación (véase, como en muchísimos otros lugares, Eddington [5]). Esta situación es enteramente desconocida ya sea en la FC o en la FQ. En la primera, la ley de la gravitación newtoniana ha de complementarse con las leyes de la mecánica, mientras que las ecuaciones de Maxwell nada nos dicen del movimiento de las fuentes, dado en su caso por la fuerza de Lorentz. Por otra parte, en la FQ la ecuación de Schroedinger –una ecuación del movimiento al fin y al cabo- contiene un término de energía potencial que debe ser especificado con base en otra teoría.

4. La expansión cosmológica

El espacio de la FC, por tanto, es representable por un continuo tridimensional real \mathbf{R}^3 (de cardinal C en cada dimensión), al que se asocia un espacio vectorial real \mathbf{V}_3 con métrica euclídea simple. El tiempo se caracterizaba como un continuo unidimensional, también de cardinal C . En concordancia con

esas ideas, el universo de la física clásica era globalmente estático, salvo movimientos locales irrelevantes a gran escala.

Esta perspectiva, como bien se sabe, cambió con la aplicación de la RG al estudio del universo, dando lugar a la moderna cosmología. Desde entonces se dispone de pruebas teóricas y experimentales acerca de una expansión del cosmos, muy distinta de lo que supondría un mero desplazamiento de las galaxias en el seno de un espacio preexistente. Por una adecuada interpretación relativista sabemos que no son los cúmulos de galaxias los que se alejan, sino que es el espacio entre ellos el que crece sin cesar; es decir, *se crea espacio* en el curso de la expansión cosmológica. Esto supone una situación cualitativamente nueva y sin parangón en todas las teorías físicas conocidas.

Ninguna otra teoría consiente la creación de alguna cosa a partir de la nada (*ex nihilo*, dirían los filósofos). Los así llamados operadores de “creación y aniquilación” de la FQ relativista, no son tales a poco que se examinen con cuidado. Lo único que hacen es tomar la célebre relación de Einstein entre materia y energía para justificar la transformación de cuantos de materia en cuantos de radiación y viceversa. Pero en cualquier caso nada se crea o se destruye en sentido estricto, y menos algo tan elusivo como el espacio. La idea física del espacio, desde los tiempos de Newton y Kant, había sido la de un ingrediente inmutable e intangible de la realidad del que resultaba impensable desprenderse para hablar de la aparición de nueva cantidad de espacio allí donde antes había menos. Ahora, gracias a la RG, estamos facultados para ello.

5. Materia, energía y tiempo

La famosísima ecuación $E = mc^2$, es quizás el buque insignia de la Relatividad einsteniana y una de las fórmulas más populares de la historia. A ella se debe el esclarecimiento de la equivalencia—mejor sería decir, identidad— entre la materia y la energía, que se nos revelan así como dos aspectos del mismo concepto [6]. Pero no sólo es eso, puesto que además se establece su matrimonio indisoluble con el momento lineal a través del tetravector energía-momento, formado con la energía (o materia, tanto da) y las tres componentes del momento lineal del sistema. Esta reconstrucción geométrica de las propiedades mecánicas de los sistemas físicos, conduce a la sorprendente superación de conceptos tan queridos por al FC como los de energía cinética y potencial.

Ya que únicamente tendremos ahora la energía propia (modulo del vector) y la energía relativa (su proyección sobre el eje temporal de cada sistema de referencia) las nociones de energía cinética y potencial dejan de tener sentido en Relatividad Especial [6]. Igualmente ocurre en la RG, donde $T_{\mu\nu}$,

el tensor de energía(materia)-momento-tensión, actúa como fuente del campo gravitacional (y donde, por cierto, para nada se utilizan las ideas de masa inercial y masa gravitatoria que tanto se manejan en los libros de divulgación –incluso en los del propio Einstein- como base del principio de Equivalencia). Vemos, pues, que no sólo en la FQ algunos conceptos clásicos, como la posición o la trayectoria, dejan de estar definidos.

Por otra parte, en los sistemas gravitatorios más generales, o en los rotatorios equivalentes, las características de la métrica espacio-temporal de la RG hacen imposible definir un tiempo del sistema. En efecto, al intentar sincronizar relojes a lo largo de una trayectoria cerrada cualquiera, al volver al punto de partida se encuentra un tiempo distinto del inicial. Es cierto que, bajo ciertas condiciones, resulta posible construir un referencial en el que pueda definirse un tiempo del sistema (sistema de referencia síncrono [7]), pero no lo es menos que en ese caso aparecerán singularidades asociadas al tipo de coordenadas elegidas, para eliminar las cuales será preciso pasar a un referencial no síncrono.

6. Deslocalización de la energía

En estrecha analogía con el campo electromagnético de Maxwell, las ecuaciones de campo gravitacional de la RG predicen asimismo la producción de ondas gravitacionales por parte de las masas aceleradas. Sin embargo, el tensor de energía, $T_{\mu\nu}$, de la RG es idénticamente nulo para una onda gravitacional pura. Esto significa que la energía gravitatoria es esencialmente no local: no podemos determinar la cantidad de esta energía en juego simplemente examinando la curvatura espacio-temporal en regiones limitadas. La energía gravitatoria no puede estar definida localmente por un motivo muy sencillo: a causa del principio de Equivalencia, para un observador en caída libre en un campo gravitacional ni existe tal campo ni la energía asociada a él. En cambio para otro observador en reposo en ese mismo punto, es un hecho que el campo existe y debe portar una energía.

Esta discrepancia se traduce en que, localmente, la energía del campo no se encuentra unívocamente definida. Desde un punto de vista geométrico, se diría que en pequeñas regiones una superficie curva es indistinguible de su plano tangente (sin curvatura) en ese lugar. La energía gravitacional –y por consiguiente la masa equivalente- está perfectamente definida en un sentido global, de modo que se garantizan los correspondientes teoremas de conservación [8]. Pero lo curioso es que, en ocasiones, dicha conservación obliga a asignar una masa gravitacional no nula a regiones planas del espacio-tiempo [9].

En este sentido la RG se asemeja a la FQ, donde a una partícula en una superposición de dos estados de espín, digamos, $\psi = a\Phi_1 + b\Phi_2$, carece de significado asignarle un valor concreto de la propiedad espín. O bien se toma el conjunto de las funciones participantes en la combinación lineal, o se tendrá una descripción errónea de la situación física real.

7. La constante cosmológica y la energía del vacío

Fue el matemático francés E. Cartan quien primero demostró que la deducción más general de las ecuaciones de campo de la RG contenía de forma natural un término introducido inicialmente por Einstein durante sus investigaciones sobre un modelo cosmológico estático. Las mencionadas ecuaciones quedaban por consiguiente, $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$, siendo Λ la desde entonces llamada constante cosmológica. La correcta interpretación física de esta constante ocasionó un mar de discusiones a partir de aquel momento. No obstante, parece claro en la actualidad que la constante cosmológica expresa una suerte de curvatura intrínseca del espacio-tiempo en ausencia de campos y materia. Pero puesto que la curvatura espacio-temporal es debida a la presencia de materia o energía, es lógico suponer que Λ nos está indicando que el estado físico usualmente denominado “vacío” no es realmente tal. Es decir, a falta de los campos y la materia ordinaria, el vacío posee una densidad energética propia imposible de eliminar.

Curiosamente, a la misma conclusión llegan las teorías cuánticas de campos (obtenidas de combinar la física cuántica ordinaria con la Relatividad Especial), cuando consideran que el vacío es un estado cuántico con una energía mínima remanente distinta de cero. Describiendo la materia mediante teorías cuánticas de campos, se deduce que en periodos muy precoces del cosmos la densidad se hallaba dominada por una energía cuántica cuya presión es negativa e iguala en valor absoluta a la densidad. Su ecuación de estado es $P_q = -\rho_q$. El tensor energía-momento de esta componentes es $\rho_q(+1, -1, -1, -1)$ o $\rho_q g_{\mu\nu}$. Esta forma nos permite integrar ciertas ecuaciones cosmológicas de las que obtenemos finalmente que $\rho_q = \Lambda$.

Es cierto que los cálculos teóricos emprendidos hasta la fecha a fin de establecer una cota máxima para el valor de Λ no han alcanzado el éxito—lo que constituye el mayor enigma de la física moderna, según S. Weinberg— pero con todo, nadie duda ya que de la RG se desprende un concepto de vacío muy diferente del sustentado por la FC.

8. Efectos sin causa, también en la RG

Se suele afirmar con harta frecuencia que uno de los rasgos emblemáticos de la FQ es la posibilidad de acaecimiento de “efectos sin causa”, o lo que es lo mismo, que la FQ es acausal. Esta suposición es tan solo parcialmente cierta ya que la evolución del vector de estado bajo la ecuación de Schroedinger es un proceso enteramente determinista. Únicamente la interacción de un sistema cuántico con otro—sea este otro un aparato de medida o no- impone la reducción o colapso del vector de estado de una manera puramente aleatoria. Sucede en realidad que un antecedente causal único (la interacción) se corresponde aleatoriamente con uno de un abanico de sucesos consecuentes (cada uno de los estados intervinientes en la superposición cuántica). Algo semejante podemos conseguir en la RG tomando como tensor de energía, $T_{\mu\nu}$, el tensor de Tetrode, de la teoría cuántica relativista, lo que tornaría probabilistas los potenciales del campo gravitatorio.

Sin embargo, en la RG encontramos casos en los que ocurre realmente que un suceso espacio-temporal o una cadena de ellos carece de un antecedente causal definido. Un ejemplo muy claro es el obtenido del modelo cosmológico llamado anti-De Sitter. En este modelo el eje temporal describe una curva cerrada, mientras que los ejes espaciales definen dos secciones hiperbólicas infinitas[10]. El espacio de este universo es ilimitado, al contrario que el tiempo, cuyo comportamiento es circular. Pues bien, en el marco de este peculiar espacio-tiempo pueden aparecer influencias causales (rayos de luz, emisiones de partículas, etc.) literalmente venidas de más allá del infinito, debido a las especiales propiedades geométricas de este espacio hiperbólico.

Un planteamiento más conocido dentro de la RG es el de los “agujeros blancos”, la contrapartida emisiva de los agujeros negros absorbedores de toda la materia circundante. De acuerdo con los teoremas de Penrose y Hawking [11], en el interior de un agujero negro existe una perforación, un agujero en la misma urdimbre del espacio-tiempo. Modificando leve pero dramáticamente las ecuaciones de los agujeros negros, obtenemos los agujeros blancos, conteniendo singularidades (o, si se quiere, agujeros espacio-temporales) de las que puede salir cualquier cosa. Dado que las singularidades constituyen bordes en el espacio-tiempo, las leyes físicas quedan en suspenso y, en principio, cualquier efecto puede emerger de él sin causa que lo provoque.

Otro objeto exótico de la RG es el denominado CTC, “curva temporal cerrada” [12]. Como su mismo nombre indica, se trata de una línea de universo sin principio ni fin que se cierra sobre sí misma formando una circunferencia espacio-temporal. La manifestación física de las CTC no puede ser más extravagante: desde el punto de vista de un observador ordinario, se apreciaría que el objeto constituyente de la CTC aparece repentinamente de la nada y se desdobra en dos copias idénticas que

se separan espacialmente (algo así como si el objeto ocupase dos posiciones en cada instante). Conforme nos aproximamos al final de la CTC dichas copias se acercarán de nuevo hasta fundirse una vez más y desaparecer tan súbitamente como se inició. Parece claro que una CTC es una entidad causalmente autocontenida en la que no pueden definirse sin ambigüedad lo que son causas y efectos. Puesto que tenemos una sucesión circular de acontecimientos espacio-temporales, cada uno de los miembros de la serie que forma la CTC puede considerarse tanto causa como efecto de todos los demás; un comportamiento, en todo caso, muy poco clásico sin duda.

9. Conclusiones

Al final de este breve recorrido por las particularidades más inusitadas de la RG, tal vez haya quedado patente que calificar esta teoría de clásica supone forzar un tanto en exceso el significado de los términos. El papel otorgado al espacio y al tiempo, la inexistencia de ciertos conceptos clásicos (las energías cinética o potencial, el tiempo global o la energía local en un sistema gravitatorio, etc.), el profundo cambio en la interpretación de otros (la expansión cosmológica, la equivalencia masa-energía) o la posibilidad de sucesos sin antecedentes causales unívocos (cosmologías hiperbólicas, agujeros blancos, CTC), son características que separan ampliamente a la RG de las teorías físicas propiamente “clásicas”, quizás tanto como de las cuánticas.

Sin duda, no es esperable que todas las predicciones teóricas contenidas en la RG se verifiquen, pero ésta es una circunstancia inherente a cualquier representación intelectual de la naturaleza. El modelo de cosmos rotatorio ideado por el matemático Kurt Gödel dentro de la RG [13], en el que aparecen CTC, no parece corresponder a nada existente en la realidad. No obstante, asimismo ocurre con la teoría cuántica relativista cuando se realiza un paso al límite despreciando los pequeños componentes de los espinores de estado, esto es, del orden de v/c . En ese caso se obtiene una ecuación con un término de acoplamiento espín-órbita, sin aparente contrapartida real en la naturaleza.

Las diferencias entre la RG, y la FQ, sin embargo, quedan muy claramente en pie. La RG no contiene probabilidades primarias, ni una estadística propia, ni postula discontinuidades básicas en la estructura de la materia y la radiación. De hecho, si deseamos introducir fermiones en el seno de la RG, resulta ineludible construir la conexión afín con el tensor métrico y con las tétradas de Cartan [14]. Ello parece indicar, pues, que la RG por sí sola es incapaz de describir el movimiento de la materia considerada microscópicamente, incluso en los casos más simples. Estos y otros problemas de más

grosso calibre –como los relacionados con las tentativas de cuantización y renormalización- permanecen como un desafío pendiente para los investigadores del futuro.

REFERENCIAS:

- [1] Bunge, M., *Controversias en física*, **Tecnos** (Madrid), 1983
- [2] Bunge, M., *Foundations of physics*, **Springer** (New York), 1967
- [3] Margenau, H., “Quantum-mechanical descriptions”, *Phys. Rev.*, **49**, 240, 1936
- [4] Popper, K., *La lógica de la investigación científica*, **Tecnos** (Madrid), 1962
- [5] Eddington, A.S., *The Mathematical Theory of Relativity*, **Cam. Univ. Press**, 1963
- [6] Alemañ-Berenguer, R.A., *Grandes Metáforas de la Física*, **Celeste** (Madrid), 1998
- [7] Landau-Lifshitz, *Teoría Clásica de campos*, **Reverté** (Barcelona), 1973
- [8] Bondi, H., “Gravitational Waves in General Relativity”, *Nature* (London), **186**, 535.
- [9] Penrose-Rindler, *Spinors and space-time*, **Cam. Univ. Press**, 1986
- [10] Misner-Thorne-Wheeler, *Gravitation*, **Freeman** (San Francisco), 1973
- [11] Penrose-Hawking, *Proc. R. Soc. Lon.*, **A 314**, 529, 1969
- [12] Hawking-Penrose, *Cuestiones cuánticas y cosmológicas*, **Alianza** (Madrid), 1993
- [13] Gödel, K., *Rev. of Mod. Phys.*, **21**, 447, 1949
- [14] De Sabbata-Gasperini., *Introduction to gravitation*, **World Scientific** (Singapore), 1985

© Rafael Andrés Alemañ Berenguer, 1998