GRAVITACIÓN (1ra Parte)

Hugo A Fernández

Introducción

Espacio y tiempo

En un espacio matemático n-dimensional cualquiera, la métrica es aquella relación que permite calcular la *distancia* entre dos puntos en ese espacio, sin que ello signifique que se trata de una longitud o un intervalo en el espacio-tiempo físico.

Cuando las coordenadas utilizadas se relacionan biunívocamente con los puntos e instantes del espacio-tiempo físico, entonces es posible establecer una métrica que permita medir las distancias físicas y los intervalos, de acuerdo con la forma funcional adoptada (geometría).

Las leyes matemáticas que describen comportamientos que involucran al espacio y al tiempo, usualmente mediante ecuaciones diferenciales, contienen también de manera implícita las propiedades del espacio-tiempo, las que quedan expresadas en la métrica que corresponda.

En general, la métrica de un espacio n-dimensional será una relación funcional de las variaciones infinitesimales (diferenciales) de las (n) coordenadas, y su tratamiento está contemplado en la rama matemática denominada *geometría diferencial*.

Cuando el espacio y el tiempo son independientes se requieren dos métricas. Para un espacio tridimensional y un tiempo unidimensional cuya evolución es independiente de la posición, tendremos:

$$ds = F(dx_1, dx_2, dx_3) \qquad ds_t = G(dt)$$

Si las coordenadas (x_1; x_2; x_3; t) corresponden a un punto en el espacio y a un instante, ds será la distancia elemental y ds_t el intervalo elemental.

La forma funcional de F y G dependerá de la geometría que adoptemos en cada caso, de acuerdo a las propiedades que asignamos al espacio y al tiempo.

Es importante destacar que si arbitrariamente proponemos que las métricas (ds y ds_t) sean *invariantes* ante transformaciones de coordenadas, entonces la geometría y las propiedades del espacio-tiempo se conservarán en cualquier sistema de referencia.

El requisito matemático necesario y suficiente para mantener una geometría dada es que la métrica sea un invariante ante cualquier cambio de coordenadas.

Por ejemplo, para un espacio bidimensional **euclídeo** podemos expresar la métrica espacial (invariante) en coordenadas cartesianas y polares, resultando:

Métrica en Coordenadas Cartesianas

$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Transformaciones de coordenadas $(x, y \leftrightarrow r, \theta)$

$$x = r\cos\theta \qquad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$y = r\sin\theta \qquad \theta = arctg\left(\frac{y}{x}\right)$$

Métrica en Coordenadas Polares

$$ds'^2 = ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2$$

Nótese que la forma funcional de la métrica es distinta entre los sistemas coordenados (cartesiano y polar), pero medirán la misma distancia entre dos puntos del espacio pues analíticamente hemos impuesto que se conserve la geometría euclídea.

En el caso galileano para coordenadas cartesianas es:

$$ds^2 = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 \qquad \text{Invariante (Espacio euclídeo)}$$

$$ds_t = dt \qquad \text{Invariante (Tiempo absoluto)}$$

Las métricas corresponden a un espacio tridimensional homogéneo e isótropo, cuya geometría es la euclídea, y a un tiempo uniforme.

Veamos un ejemplo unidimensional que nos muestre el significado de la *invariancia de métrica* y de la *invariancia de forma*.

Supongamos que la longitud de un objeto ($L = |x_2 - x_1|$) no depende de su posición en el espacio, siendo x la única coordenada espacial. En este caso diremos que este espacio de una dimensión es homogéneo.

La métrica es $ds = dx$ y la longitud del objeto estará dada por:

$$L = \text{módulo}\left[\int_{x_1}^{x_2} dx\right] = |x_2 - x_1|$$

Cambiemos de sistema de coordenadas ($X' \leftrightarrow x$) mediante la siguiente transformación no lineal:

$$X' = b \cdot x^2 \qquad b = Cte$$

Si pedimos que la métrica sea invariante resulta:

$$ds' = ds = \frac{dX'}{2\sqrt{b \cdot X'}}$$

La longitud del objeto en este nuevo sistema de coordenadas estará dado por:

$$L' = \text{mód}\left[\int_{X_1'}^{X_2'} \frac{dX'}{2\sqrt{b \cdot X'}}\right] = \left|\frac{\sqrt{X_2'} - \sqrt{X_1'}}{\sqrt{b}}\right| = L$$

Es fácil verificar que la longitud se conserva pues es la misma en ambos sistemas de coordenadas, cualquiera sea la posición en que se encuentre, y ello se debe a que hemos pedido que la métrica sea invariante.

Aclaremos que sin el requisito de invariancia de la métrica la geometría debe cambiar.

Por otro lado, si hubiéramos propuesto que en el nuevo sistema de coordenadas la distancia elemental fuera la nueva métrica *ds' = dX'*, conservando la forma, entonces la longitud del objeto sería distinta en este sistema de coordenadas, dependiendo de la posición, perdiéndose la homogeneidad y cambiando la geometría establecida en el sistema original pues varió la métrica.

En definitiva, en cualquier espacio métrico las propiedades quedan establecidas por su métrica, y su geometría subyacente se conserva sólo si la métrica es invariante ante transformaciones de coordenadas.

Es fácil mostrar que una métrica invariante también conservará su forma funcional si la transformación es lineal.

Un caso importante es el de las *"Transformaciones de Galileo"*, que relacionan dos sistemas inerciales en movimiento relativo.

Estas transformaciones particulares tienen una métrica espacial distinta. No obstante, para mediciones espaciales **simultáneas** conservan la geometría euclídea.

Métricas en el sistema cartesiano inicial

$ds^2 = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2$ Invariante (Espacio euclídeo)

$ds_t = dt$ Invariante

Transformaciones de Galileo (generales)

$$\left.\begin{aligned} x' &= x - V_x\, t \\ y' &= y - V_y\, t \\ z' &= z - V_z\, t \end{aligned}\right\} \quad \vec{r}\,' = \vec{r} - \vec{V}\, t$$

$$t' = t$$

Métricas en el nuevo sistema (primado)

$d\vec{s}\,' = d\vec{s} - \vec{V}\, dt$

La métrica es Invariante (Espacio euclídeo) sólo si las distancias se miden (sus extremos) simultáneamente (dt = 0)

$ds_t' = dt$ Invariante (Tiempo absoluto)

Si bien el espacio y el tiempo son independientes estas transformaciones los vinculan porque los dos sistemas están en movimiento relativo. Las propiedades del espacio serán las mismas (euclídeo) si las coordenadas se determinan simultáneamente.

Ello, físicamente implica que para medir la longitud entre dos puntos de un objeto en movimiento sus coordenadas deben determinarse al mismo tiempo, o bien corregir por cálculo si esas medidas no fueron simultáneas.

El procedimiento por el cual las propiedades y la geometría del espacio y el tiempo han sido establecidas históricamente, desde Pitágoras hasta la fecha, fue siempre mediante el estudio de los invariantes observables. La escuela pitagórica primero, y posteriormente el geómetra Euclides, basados en la creencia popular de que la forma de los cuerpos sólidos no dependía de la posición, la orientación, o el estado de su movimiento, asumieron que la distancia entre dos puntos cualesquiera de un cuerpo rígido (y del espacio que lo contenía) era un invariante.

En consecuencia, el espacio físico era considerado un espacio métrico tridimensional que tenía las mismas propiedades en cualquier región y para todo observador, lo que condujo a la noción de espacio *"homogéneo e isótropo"*, de geometría euclídea.

Asimismo, la repetición de los fenómenos bajo idénticas condiciones iniciales y los distintos procesos astronómicos periódicos, tales como las cuatro estaciones anuales, indujeron a aceptar que la evolución temporal era uniforme y la misma para todo observador, lo que hoy denominamos *"uniformidad del tiempo"*. Esta proposición se consolidó cuando Galileo descubrió la *Ley de isocronismo* del péndulo, proveyendo la primera escala de tiempos de la historia.

Recién con el descubrimiento del *espacio de Minkowski* en el año 1908 [1], basado en los trabajos de Poincaré, Lorentz y Einstein, quedó claro que la geometría euclídea no era consistente con los fenómenos observados entre sistemas en movimiento relativo.

Si bien el espacio seguía siendo euclídeo en cada sistema (para cuerpos en reposo), se modificaba al menos una de las escalas coordenadas entre sistemas inerciales cuando estaban en movimiento relativo.

De igual modo, la evolución temporal continuaba uniforme en todo sistema inercial, pero distinta entre sistemas en movimiento relativo.

Coloquialmente podemos asegurar que un reloj perfecto medido en movimiento tiene diferente forma y marcha más lento que en reposo, fenómenos que recién se hacen notorios a muy altas velocidades.

La causa de esta pérdida de invariancia de las métricas (espacial y temporal) entre sistemas en movimiento relativo es la dependencia funcional existente entre el espacio y el tiempo, relación que comenzó a vislumbrarse en el año 1900 por los trabajos de Poincaré y Lorentz.

El electromagnetismo y la propagación de la luz mostraban comportamientos que no eran compatibles con las propiedades aceptadas del espacio-tiempo. Lorentz encontró la relación funcional entre espacio y tiempo, y Poincaré estableció el marco conceptual y teórico de la Teoría Especial de Relatividad, por lo cual espacio y tiempo no podían ser considerados independientes o ser tratados por separado.

Minkowski demostró que la métrica **invariante** (única) y consistente con los nuevos avances (Lorentz), debía contener al espacio y al tiempo, es decir que correspondía a un espacio matemático de 4 dimensiones (3 espaciales y 1 temporal) con geometría seudo euclídea, cuya expresión es:

$$ds^2 = c^2dt^2 - \left(dx^2 + dy^2 + dz^2\right) \qquad \text{Invariante}$$

Es interesante indicar que ello fue aceptado de forma natural por los matemáticos antes que por los físicos, ya que la teoría de invariantes no era una línea de estudio entre estos últimos.

Corresponde señalar que Minkowski y tratados posteriores describen la invariancia de la métrica de tal manera que la geometría subyacente, denominada seudo euclídea, se conserva en todos los sistemas inerciales, sin hacer referencia o análisis detallado de los no inerciales. De esta forma indirecta se indujo la falsa suposición de que no era aplicable en sistemas no inerciales, error que fue puesto de manifiesto y corregido por el físico ruso A. A. Logunov de manera rigurosa [2] [3].

Actualmente la comunidad científica en general acepta sin discusión dos modelos que tratan sobre el espacio y el tiempo, las teorías Especial y General de Relatividad, las cuales se usan y aplican en la Física de acuerdo al problema particular que se trate, pero nunca simultáneamente, pues sus postulados resultan antagónicos y excluyentes entre sí.

La incompatibilidad insalvable entre estas dos teorías suele ser subestimada o incluso negada, por lo cual es frecuente encontrar falsas referencias al respecto, como por ejemplo indicar que la teoría Especial no es aplicable en sistemas no inerciales, que la teoría General es una generalización de la Especial y la contiene, o que la gravitación no puede ser modelada en el marco de un espacio-tiempo de Minkowski.

La formulación moderna de la Teoría de Relatividad Especial, elaborada por Logunov [3], se basa en que *los fenómenos físicos ocurren en un espacio cuadridimensional cuya geometría es seudo euclídea*.

Si bien ello fue establecido en la formulación de Minkowski, su significado profundo no fue comprendido en general durante muchas décadas y aún sigue en la oscuridad para muchos especialistas. Un aspecto demostrativo de ello es la importancia que la bibliografía específica, actual y pasada, le brinda a la invariancia de forma de las leyes, requisito que sólo es necesario en sistemas inerciales, y la poca atención que se da a la invariancia de la métrica, condición que conserva la geometría y las propiedades del espacio-tiempo en cualquier sistema de referencia.

Este nuevo enfoque no necesita postular el Principio de Relatividad ni la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío, comportamientos que se deducen de la teoría [3] [4] [5] [6].

Es llamativo que un Principio tan simple y sucinto se reconozca muchos años después de la aparición y aceptación de la teoría que fundamenta, máxime cuando su alcance abarca todas las ramas de la Física, hecho que podemos atribuir a la complejidad para relacionar los conceptos de espacio y tiempo con la geometría subyacente y con su rol rector en el comportamiento de los fenómenos físicos.

En su tratamiento Logunov demuestra que la Teoría Especial es aplicable en todo sistema de referencia cuya geometría sea seudo euclídea, incluyendo a los sistemas no inerciales, logrando de esta forma desterrar la creencia de que la Teoría Especial sólo es aplicable en sistemas inerciales.

De acuerdo con este planteo un dado sistema de coordenadas (cuadridimensional) es *"admisible"* para la descripción de los fenómenos físicos si existe una transformación funcional, no necesariamente lineal, que permita que la métrica del nuevo sistema se exprese según:

$$ds^2 = \left(dx^0\right)^2 - \left[\left(dx^1\right)^2 + \left(dx^2\right)^2 + \left(dx^3\right)^2\right] = \eta_{mn}\, dx^m\, dx^n$$

$$\text{Siendo} \quad \eta_{mn} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{el tensor métrico}$$

Una vez encontrada esta transformación es posible por cálculo determinar la forma de la métrica del sistema inicial de coordenadas, tal que tenga las propiedades asignadas al espacio-tiempo de Minkowski.

De esta manera podemos asegurar que ambos sistemas de coordenadas, el inicial y el transformado, se aplican en un espacio-tiempo cuya geometría es seudo euclídea, y ello incluye también a sistemas no inerciales si la transformación funcional no es lineal en al menos una de sus coordenadas.

Asimismo, Logunov demostró que para todo sistema de referencia admisible, inercial o no, existen infinitos otros sistemas donde los fenómenos físicos ocurren de igual forma que en el sistema inicial, generalizando el Principio de Relatividad (como teorema).

Cuando las transformaciones arbitrarias correspondan a sistemas acelerados respecto de uno inercial, los efectos inerciales aparecerán naturalmente en la nueva métrica y estarán expresados en los símbolos de Chrystoffel del espacio de Minkowski.

Se destaca que este procedimiento lo utilizó Logunov para formular su moderna Teoría Relativista de Gravitación [2].

Relatividad y los Principios Universales de Conservación

El hecho de que la Relatividad Especial sea obtenida de las propiedades del espacio y el tiempo reviste una importancia crucial debido a que las leyes y teorías relativistas de la Física, entre las que se destaca el electromagnetismo de Maxwell, tienen en general una verificación experimental abundante, confirmando de manera indirecta la validez de la propuesta sobre la geometría seudo euclídea del espacio-tiempo.

Además, dado que esta formulación tiene exactamente los mismos fundamentos que requiere el teorema de Noether [7] para demostrar que los *"Principios Universales de Conservación"* resultan de las mismas propiedades de simetría del espacio-tiempo, se concluye que **la Teoría de Relatividad Especial posee la misma jerarquía y validez que las leyes de conservación de la energía, de la cantidad de movimiento y del momento angular.**

En consecuencia, debemos considerar que todo modelo basado en otras propiedades del espacio-tiempo, como es el caso de la Teoría General, no será consistente con la Teoría Especial ni con los Principios Universales.

Asimismo, la existencia de una única y absoluta velocidad máxima posible que resulta de asumir una geometría seudo euclídea permite asegurar que cualquier propuesta que contenga otra alternativa, tal como atribuir velocidades máximas diferentes para el electromagnetismo y la gravedad [8] [9], tendrá una geometría distinta y tampoco será consistente con la Teoría Especial ni con los Principios Universales.

La Teoría General de Relatividad propone un espacio-tiempo de métrica variable punto a punto (x, y, z, t), denominado *espacio curvo*. La variación de la métrica, que depende de la distribución de materia-energía, queda determinada por el *tensor de curvatura*, excluyendo de manera absoluta la geometría seudo euclídea si hay masas presentes.

Ningún sistema de referencia del espacio-tiempo curvo con tensor de curvatura no nulo admite una transformación que resulte en un sistema de referencia de geometría seudo euclídea, simplemente porque las transformaciones matemáticas no cambian la geometría subyacente.

La única vinculación posible entre las teorías General y Especial ocurre cuando no hay materia (energía) presente, es decir cuando la Teoría General deja de ser una teoría de gravitación.

La razón física por la cual la Teoría General es contradictoria con la Teoría Especial es la postura antagónica respecto a la existencia de las interacciones gravitatorias.

Einstein propuso que la supuesta fuerza de atracción entre masas, como se asume en la caída libre de un cuerpo en la Tierra, sólo era un efecto "aparente" provocado por la modificación de la métrica espacio temporal, debida a las masas.

Aclaremos un poco más esta proposición. Lo que un observador "*galileano*" terrestre interpreta como movimiento acelerado del objeto que cae, adjudicándole como causa la presencia de una fuerza gravitatoria aplicada (interacción), según Einstein es un movimiento uniforme en un espacio-tiempo (curvo), cuya métrica es variable, sin que exista interacción alguna.

La dificultad no está en la correcta descripción cinemática del fenómeno en ambos casos, pues ello depende sólo de las coordenadas que se usen, sino en la existencia o no de las interacciones gravitatorias.

Podría creerse que la interpretación geométrica de Einstein es equivalente a la de una interacción, asumiendo que es otra forma de describirla, pero ello no es cierto.
Las interacciones involucran transferencia de energía y modifican a los participantes de diversas maneras, dando lugar a varios efectos, por lo cual son procesos causales.

Si existe interacción no es posible esconderla debajo de la alfombra ni es "aparente", pues cambia el estado de los sistemas en interacción, al menos durante la interacción. El estado de un sistema físico real queda determinado por los valores numéricos que toman sus variables de estado (propiedades), de tal manera que cuando una de ellas cambia al menos otra también lo hace. Es decir que un cambio de estado implica modificaciones en por lo menos dos de sus propiedades en cada participante, y ello no puede ser eliminado con la elección de un sistema de referencia.

Este hecho es relevante pues permite asegurar que si se demuestra la existencia de interacciones gravitatorias la hipótesis de Einstein sería incorrecta, y viceversa.

El Principio de Covariancia de la Relatividad General permite obtener leyes válidas en general en el espacio curvo, dando una adecuada metodología tensorial para adaptar las leyes físicas en coordenadas arbitrarias, pero ello no resuelve la incompatibilidad entre teorías respecto a la existencia de las interacciones gravitatorias.

Podemos incorporar en el espacio curvo, por ejemplo, las leyes del electromagnetismo de Maxwell partiendo de su expresión tensorial en el espacio de Minkowski, logrando descripciones correctas si en el fenómeno tratado no interviene la gravedad.

Sin embargo, como la teoría General no incluye la existencia de procesos causales de origen gravitatorio, siendo ello un requerimiento necesario en la Especial, estas teorías darán lugar a comportamientos distintos cuando no sea despreciable la gravedad.

Por este motivo todos aquellos procesos que involucren a la gravedad serán diferentes según se traten en el marco de la Teoría Especial o la General, pues no se trata del mismo comportamiento descrito en coordenadas distintas.

En consecuencia, la Teoría General es un modelo de gravitación incompatible con los postulados básicos comunes a la Teoría Especial, a los Principios Universales y, por extensión, a todas las leyes relativistas clásicas, cuya aplicación en el espacio curvo quedaría limitada sólo al caso en que los fenómenos gravitatorios sean despreciables o inexistentes, en cuyo caso no es necesaria la teoría General ni el espacio curvo.

Obviamente, ambas teorías (Especial y General) no pueden tener validez rigurosa, lo que permite asegurar que al menos una es incorrecta.

Causalidad de las interacciones gravitatorias

Hemos visto que en la Teoría General no se cumplan los Principios Universales ni la Relatividad Especial. Más aún, debemos resaltar que en procesos en que interviene la gravedad ninguna ley clásica relativista es válida en el espacio curvo de la Teoría General, y ello incluye la teoría de Maxwell.

La incompatibilidad con el electromagnetismo de Maxwell se hará notoria en aquellos procesos de naturaleza electromagnética en que intervenga la gravitación.
Un caso muy discutido (históricamente) ha sido el del comportamiento de un electrón en un campo gravitatorio uniforme (ver *"La paradoja de Born"*), aunque es pertinente aclarar que las contradicciones entre las teorías son válidas cualquiera sea la forma funcional del campo gravitatorio.

De acuerdo con la Teoría General un electrón libre en un campo gravitatorio arbitrario no está sometido a interacción alguna, su movimiento será uniforme (o en reposo) en el espacio curvo y, en consecuencia, no irradia.

El comportamiento mecánico del electrón es igual al de cualquier partícula sin carga eléctrica en idénticas condiciones iniciales, siendo ello consistente con el Principio de Equivalencia de la Relatividad General y con las ecuaciones de Maxwell en el espacio curvo.

Por el contrario, en el enfoque de la Teoría Especial el electrón está acelerado, lo que implica una interacción, siendo ello un proceso causal y absoluto que no puede ser eliminado con la elección de un sistema de referencia particular.

En estas condiciones la electrodinámica predice que el electrón acelerado debe emitir radiación de frenado (*"Bremsstrahlung gravitatorio"*). Si el fenómeno de radiación de frenado ocurre, entonces el tipo de movimiento de una partícula con carga será distinto al que tendría sin carga, lo que invalidaría el Principio de Equivalencia.

Como era de esperar, estos modelos predicen comportamientos diferentes para un mismo fenómeno físico.

Algunos autores prestigiosos [10][11][12] han intentado encontrar una explicación que satisfaga las dos posturas, objetivo imposible y fantasioso que podría atribuirse a que la incompatibilidad entre las dos teorías no era tan evidente antes de los trabajos de Logunov.

Muchas publicaciones científicas [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25], tratan sobre el particular argumento (y sus variantes) que sostiene que un cuerpo cargado y en reposo sobre la superficie terrestre emite radiación que es detectada por un observador en caída libre, pero inexistente para otro en reposo en la Tierra, debido a que para este último la radiación queda detrás del horizonte de sucesos.

Este insólito argumento nos muestra que los autores no reconocen que un fenómeno causal no puede ser eliminado con un sistema de referencia.

Más aún, resulta imposible de entender que una propuesta semejante pueda sobrevivir décadas, provocando incluso que científicos de renombre elaboren complejos cálculos para sostener con publicaciones un acto de magia, esto es que la radiación de un cuerpo cargado en reposo respecto de un observador pueda quedar escondida detrás del horizonte de sucesos.

Al respecto digamos que si eso sucediera, entonces el observador terrestre no vería sus zapatos, ni el piso, ni nada en reposo que esté debajo de sus ojos, pues tampoco le llegaría la luz que emiten o reflejan esos cuerpos, puesto que dicha radiación visible tiene similares condiciones de contorno, posee la misma naturaleza y responde a las mismas leyes que la supuesta radiación del cuerpo cargado.

La emisión de radiación de una carga acelerada es un proceso causal que se inicia en la carga, por lo cual si el fenómeno existe para un observador, existe para todo aquel que esté en condiciones de ver al objeto emisor, siendo ello independiente del estado de movimiento del observador.

Proponer que la radiación proveniente de un sistema físico cualquiera, sea reflejada o emitida, pueda quedar escondida eligiendo un sistema de referencia particular no se respalda en el conocimiento actual. No obstante, esta proposición fue aceptada sin titubeos por muchos autores, dando lugar a múltiples artículos y a desarrollos de infundadas conjeturas, tales como el *"efecto Unruh"* y la *"radiación de Hawking"*.

Inconsistencia de la Hipótesis de Einstein sobre la curvatura del espacio

Los fenómenos electrodinámicos nos dan un recurso clave para verificar la hipótesis de Einstein sobre la métrica del espacio-tiempo. En particular, si fuera correcto que la masa de la Tierra modifica la métrica, entonces todo cuerpo cargado y ubicado sobre la superficie terrestre está acelerado en el espacio curvo y por ello su velocidad es una función del tiempo en dicho espacio.

Esto es simple de describir en el espacio curvo. Dado que un objeto en caída libre es considerado con movimiento uniforme (o en reposo) en el espacio curvo, entonces la superficie terrestre y todo objeto sobre ella están acelerados.

Según Einstein, un observador en caída libre está en un **sistema inercial** sin campo gravitatorio, y observa que la superficie terrestre y un cuerpo cargado sobre ella se le acercan con movimiento acelerado. Si el sistema de referencia del observador en el espacio curvo fuera inercial, entonces el cuerpo debería irradiar.
La descripción cinemática es correcta, el resto no.

La fuerza que acelera al cuerpo está aplicada por la superficie terrestre que lo soporta, siendo este un fenómeno causal de naturaleza mecánica, no debido a la gravedad.
En consecuencia, en el espacio curvo tenemos una interacción mecánica que acelera un cuerpo cargado, por lo cual debe emitir radiación de frenado clásico, con su eje principal de simetría en la dirección de la velocidad del cuerpo en dicho sistema, normal y saliente a la superficie terrestre, hecho que no ha sido observado jamás, ni aún en condiciones óptimas para la detección, como sería en los generadores de *"van der Graaff"*.

Estas inconsistencias son suficientes para concluir que la hipótesis de Einstein sobre la curvatura del espacio por la presencia de masa es incorrecta.

Una tendencia actual de moda, perniciosa para el avance de la Ciencia, es aceptar como una limitación que "ciertos" fenómenos electrodinámicos no se cumplen en la Teoría General. Esta postura no reconoce o ignora que esas inconsistencias invalidan exactamente la propuesta que las generan, es decir la curvatura del espacio-tiempo.

Importante bibliografía y artículos refieren a que la Teoría General tiene varias pruebas que convalidan la curvatura del espacio-tiempo por presencia de materia, dando por sentado que el modelo representa adecuadamente la gravitación.
Al respecto, es mi opinión que no hay verificación experimental alguna que convalide la hipótesis de Einstein pero, como vimos, sí hay fenómenos en electrodinámica que la invalidan.
Las famosas tres pruebas de "validez", conocidas como la curvatura de la luz, la ley de corrimiento al rojo y el desplazamiento del perihelio de Mercurio, han sido deducidas también con teorías alternativas que no recurren a la curvatura del espacio-tiempo, por lo cual estas pruebas deben ser consideradas como de consistencia, que significa algo muy distinto a validez.
Corresponde aclarar que los resultados sobre la curvatura de la luz son cuestionables en todos los casos publicados, ya sea por la metodología inadecuada usada o por el diseño experimental correspondiente. Hasta el momento no tenemos medidas de la curvatura de la luz que sean confiables.
Por otro lado, los logros declamados por los cosmólogos que adhieren al modelo del Big Bang no pueden ser tenidos en cuenta pues se trata de interpretaciones basadas en una sucesión de conjeturas concatenadas. Asimismo, la acostumbrada práctica de incluir parámetros y supuestos fenómenos (materia oscura, inflación, etc.) para que se cumplan los deseos del autor, no pertenece al método científico.

Un caso interesante que muestra la diferencia conceptual entre los dos modelos (Especial y General) es el de la variación de la energía de los fotones en presencia de gravedad, fenómeno llamado *efecto Einstein*, que fuera verificado con el experimento de Pound y Rebka [28] en 1960.

En la Teoría General el fotón modifica su energía durante su viaje debido al cambio de la métrica temporal punto a punto. Las frecuencias correspondientes al fotón en dos puntos de su trayectoria (1 y 2) cumplen la siguiente relación:

$$\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\sqrt{-g_{00}(x_1)}}{\sqrt{-g_{00}(x_2)}}$$

En el límite para campo débil es $g_{00} = -1 - \frac{2\phi}{c^2}$, siendo ϕ el potencial de Newton, que aplicado en los dos puntos (en primera aproximación) resulta:

$$\frac{\Delta E_{fotón}}{E_{fotón}} = \frac{\nu_2}{\nu_1} - 1 = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{c^2}\ .$$

Es evidente que para que esta propuesta sea válida debemos aceptar que el espacio-tiempo es fuente (o sumidero) de la energía, dependiendo esto último de la dirección y sentido del fotón respecto de la masa que cambia la métrica, es decir que además de postular el cambio de métrica debemos agregar propiedades dinámicas inesperadas del espacio-tiempo e invalidar el principio de conservación de la energía.
Este comportamiento extraño del espacio-tiempo vale también para fotones medidos por un observador en caída libre en un campo gravitatorio (observador no inercial en sentido galileano). Dado que un fotón tendrá siempre mayor velocidad que cualquier observador y la métrica cambia punto a punto, todo observador medirá que el fotón en presencia de gravedad modifica su energía durante su trayectoria.
Aunque no es usual que este tema se analice en la bibliografía específica, debemos reconocer que es sumamente llamativo y discutible el hecho de atribuirle al espacio-tiempo la capacidad de entregar o quitar energía a todo sistema físico que se mueva.

Por otro lado, si asumimos la existencia de las interacciones campo gravitatorio-fotón se puede mostrar con la Teoría Especial que la energía de un fotón se modifica como consecuencia del trabajo de la fuerza gravitatoria.
En este caso el campo gravitatorio debe tratarse con igual jerarquía que cualquier otro tipo de campo físico real capaz de producir efectos dinámicos, y considerar al fotón como una partícula. Como demostraremos en este mismo artículo más adelante, el campo será conservativo si es estacionario, lo que permite relacionar el trabajo con la variación del potencial gravitatorio.

El Principio de Equivalencia entre masa y energía, verificado experimentalmente para cualquier estado de movimiento de una partícula, establece que el contenido total de energía de una partícula, sea masiva o no (fotones), es igual al producto de su *masa relativista* por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cualquier modificación de su contenido energético, sin importar el mecanismo que la produzca, irá acompañada por un cambio de su masa relativista, cumpliéndose:

$$dE = c^2 dm$$

Si el fotón está en presencia de un campo gravitatorio estacionario y consideramos que se comporta dinámicamente como una partícula, el trabajo realizado por el campo entre dos puntos será igual a la variación de energía del fotón, resultando:

$$dE = \vec{F} \cdot d\vec{s} = -m \nabla \phi \cdot d\vec{s} = -m\, d\phi = c^2 dm$$
$$\Rightarrow \qquad \frac{dm}{m} = -\frac{d\phi}{c^2}$$

Integrando esta ecuación diferencial entre dos puntos (1 y 2) se obtiene una ley de conservación de la masa (relativista) y el potencial gravitatorio, de validez general y rigurosa para toda partícula en presencia de un campo gravitatorio estacionario.

$$m_1\, e^{\phi_1 / c^2} = m_2\, e^{\phi_2 / c^2} = Cte$$

$$\Rightarrow \qquad m\, e^{\phi / c^2} = Cte$$

Este resultado, sustentado en la conservación de la energía, nos permite calcular la Energía Potencial de la partícula en un campo gravitatorio conservativo, y la fuerza aplicada.

$$E = mc^2 + E_P = Cte \quad \Rightarrow \quad E_P = -mc^2 + Cte$$
$$\Rightarrow \quad E_P = -m_{\phi_0}\, c^2\, e^{-(\phi - \phi_0)/c^2} + Cte$$

Siendo m_{ϕ_0} la masa relativista en $\phi = \phi_0$

$$\vec{F} = -\nabla E_P = -\underbrace{\left[m_{\phi_0}\, e^{-(\phi - \phi_0)/c^2} \right]}_{\text{masa relativista en } \phi} \nabla \phi = -m \nabla \phi = m\vec{g}$$

Para el caso de un *fotón* podemos calcular la variación relativa de su energía entre los puntos 1 y 2, resultando:

$$E_{fotón} = h\nu = m_{fotón}\, c^2 \quad ; \quad \nu_1\, e^{\phi_1 / c^2} = \nu_2\, e^{\phi_2 / c^2}$$

$$\frac{\Delta E_{fotón}}{E_{fotón}} = \frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = e^{-(\phi_2 - \phi_1)/c^2} - 1$$

Desarrollando en serie para campos débiles esta última relación, obtenemos el mismo resultado que con la Teoría General, mostrando que el efecto Einstein es en realidad una aproximación limitada a campos gravitatorios débiles, consistente con la expresión general obtenida con la Teoría Especial.

Referencias

1 – H. Minkowski - *Raum und Zeit,* The Report, Read to Naturalists' Society in Kologne, 1908, Phys. Ztschr., 1909, Bd 10, S. 104.

2 – A. Logunov - *"The Theory of Gravity"*, 2002.
http://arxiv.org/PS_cache/gr-qc/pdf/0210/0210005v2.pdf

3 – A. Logunov - *"Curso de Teoría de la Relatividad y de la Gravitación"*, Parte I, 1998.

4 – N. Mermin - *"Relativity without light"*, Am. J. Phys. 52 (2), 1984.

5 – S. Cacciatori et al - *"Special Relativity in the 21st century"*, 2008.

6 – M. J. Feigenbaum - *"The Theory of Relativity - Galileo's Child"*, 2008.

7 – E. Noether - *"Invariante Variationsprobleme"*. Nachr. D. König. Gesellsch. D. Wiss. Zu Göttingen, Math-phys. Klasse , 1918, 235–257.
http://www.physics.ucla.edu/~cwp/articles/noether.trans/english/mort186.html

8 – T. van Flandern - *"The speed of gravity - What the experiments say"*, 1998.

9 – S. Kopeikin - *"Bi-metric theory of gravity"*, 2006.
http://arxiv.org/abs/physics/0503066v1.

[10] – G. Nordström - *"Note on the circumstance that an electric charge moving in accordance with quantum conditions does not radiate"*, Proc. Roy. Acad. Amsterdam 22, 145-149, 1920.
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/nordstrom_praa_22_145_20.pdf

[11] – W. Pauli – *"Relativitätstheorie".* Enzyl. Math. Wiss. Vol. V, part II, no. 19, 543-773 (1921) – *"Theory of Relativity".* Pergamon Press, New York, 1958, pág 98.

[12] – Discussion of how Feynman indicated that he agreed (at one time) that a uniformly accelerated charge does not radiate.
http://www.mathpages.com/home/kmath528/kmath528.htm

[13] – D. Boulware – *"Radiation from a Uniformly Accelerated Charge"* - Annals of Physics 124, 169-188, 1980.
http://www.hep.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/boulware_ap_124_169_80.pdf

[14] – S. Parrott – *"Radiation from a Uniformly Accelerated Charge and the Equivalence Principle".* arXiv:gr-qc/9303025v8, 5 Oct 2001.
http://xxx.lanl.gov/PS_cache/gr-qc/pdf/9303/9303025v8.pdf

[15] – H. Bondi; T. Gold – *"The field of a uniformly accelerated charge, with special reference to the problem of gravitational acceleration"*, Proc. Roy. Soc. (London) 229A, 416-424 (1955).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/bondi_prsla_229_416_55.pdf

[16] – B. DeWitt; R. Brehme – *"Radiation Damping in a Gravitational Field".* Ann. Phys. 9, 220-259 (1960).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/dewitt_ap_9_220_60.pdf

[17] – T. Fulton; F. Rohrlich – *"Classical Radiation from a Uniformly Accelerated Charge".* Ann. Phys. 9, 499-517 (1960).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/fulton_ap_9_499_60.pdf

[18] – F. Rohrlich – *"The Equations of Motions of Classical Charges".* Ann. Phys. 13, 93-109 (1961).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/rohrlich_ap_13_93_61.pdf

[19] – N. Rosen – *"Field of a Particle in Uniform Motion and Uniform Acceleration".* Ann. Phys. 17, 26-275 (1962).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/rosen_ap_17_26_62.pdf

[20] – T. Bradbury – *"Radiation Damping in Classical Electrodynamics".* Ann. Phys. 19, 323-347 (1962).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/bradbury_ap_19_323_62.pdf

[21] – C. Leibovitz; A. Peres - *Energy Balance of Uniformly Accelerated Charge*, Ann. Phys. 25, 400-404 (1963).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/liebovitz_ap_25_400_63.pdf

[22] – C. DeWitt; B. DeWitt - *Falling Charges*, Physics 1, 3-20 (1964).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/EM/dewitt_physics_1_3_64.pdf

[23] – F. Rohrlich - *Classical Charged Particles* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1965.

[24] – A. Nikishov; V. Ritus - *Radiation Spectrum of an Electron Moving in a Constant Electric Field*, Sov. Phys. JETP 29, 1093-1097 (1969).
http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/QED/nikishov_spjetp_29_1093_69.pdf

[25] – J. Herrera - *Relativistic Motion in a Constant Field and the Schott Energy*, Nuovo Cim. 70B, 12-20 (1970).

[26] – W. Unruh - "Notes on Black Hole Evaporation", Phys. Rev. D **14**, 870 (1976), W.G. Unruh

[27] – S. Hawking - *"Black hole explosions?"*. *Nature* **248** (5443): 30. 1974.

[28] – R. Pound; G. Rebka*.* «Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance»*.* 1959. Physical Review Letters*. Vol. 3. n.º 9. pp. 439-441.* DOI 10.1103/PhysRevLett.3.439

Hugo A Fernández
hafernandez@fibertel.com.ar
Profesor Titular de Física Moderna
Universidad Tecnológica Nacional Argentina