# ¿Para qué la Teoría de la Relatividad General?

**Palabras clave:** Teoría de la gravitación, Movimiento Relativo, Relatividad Especial, Relatividad General, Interpretación Relativista de la Gravedad.

## Resumen

Cuando Newton estableció la ley de la Gravitación Universal se consideraba que, tanto el tiempo como el espacio, eran absolutos en el sentido de que, en todo movimiento, ambos tenían los mismos valores para cualquier observador.

Posteriormente, gracias a los meticulosos ensayos realizados por Michelson y Morley, se pudo comprobar que, ni el tiempo ni el espacio, tenían el carácter de absolutos si no que tal privilegio estaba reservado, únicamente, a la velocidad de la luz en el vacío. Esta constatación provocó una auténtica crisis en el mundo científico que fue superada por Einstein, en su Teoría de la Relatividad Especial, lo que puso en cuestión muchos conceptos que hasta entonces eran universalmente aceptados.

Esta Teoría era válida mientras el movimiento relativo entre los posibles observadores fuera una traslación rectilínea y uniforme; pero ¿qué ocurriría si tal movimiento estuviera sometido a cualquier aceleración?. La Teoría de la Relatividad General pretende dar respuesta a esta pregunta como consecuencia de la interpretación relativista de la gravedad.

**Key words:** *Gravitation Theory, Relative movement, Special Relativity, General Relativity, Relativist interpretation of gravity.*

## Abstract:

*When Newton set the universal gravitation theory both time and space were considered absolute in the sense that, for any movement, both distance and time reached identical values for any observer.*

*Only later, through the precise experiments carried out by Michelson and Morley, it was proved that neither time nor space were absolute and that only the speed of light in vacuum enjoyed that privilege. That brought about a genuine crisis to the scientific world that only Einstein was able to resolve through his Theory of the Special Relativity. This Theory put under question many concepts that until then were universally accepted.*

*This Theory was valid as long as the relative motion between the possible observers was a rectilinear translation in the space and constant in time but… what would happen if such relative motion was subject to any given acceleration? The Theory of the General Relativity tries to answer this question through the relativist interpretation of gravity.*

***Luis García Pascual***

Doctor Ingeniero Electromecánico del ICAI, Promoción 1957. Diplomado en Organización Industrial. Profesor Emérito de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del ICAI (Universidad Pontificia Comillas de Madrid).

Los padres de la Mecánica Clásica (Galileo y Newton) pensaban que los conceptos de espacio, tiempo y masa inercial (como magnitudes fundamentales de la Mecánica) eran absolutos en el sentido de que, para los distintos observadores que pudieran pretender manejarlos, tenían el mismo valor, independientemente del movimiento relativo que pudiera haber entre los sistemas, en los que se encontraran tales observadores. En consecuencia, las leyes físicas de la Mecánica Clásica, en las que siempre intervienen algunas o todas estas magnitudes, no solo tendrían la misma forma conceptual, sino que emplearían los mismos valores para estas magnitudes fundamentales, cualquiera que fuera el sistema elegido para cuantificarlas. Por ello, aunque inicialmente Newton utilizó, para la segunda ley de sus famosos **Principia,** la expresión

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{d(mv)}}{\mathbf{dt}},$$

no dudaría sustituirla por la forma más sencilla $\mathbf{f = ma}$; ya que el valor de la masa lo consideraba idéntico para cualquier observador y en cualquier instante.

Todo funcionó muy bien hasta que Michelson y Morley, mediante sus escrupulosísimos ensayos, comprobaron que ni el tiempo ni el espacio eran absolutos, en el sentido al que antes nos referíamos, sino que tal privilegio lo ostentaba el valor **c** de la velocidad de la luz (esta velocidad tiene un valor finito e independiente de la velocidad de la fuente desde que se emita o del observador que pretenda medirla). Por ello, los protagonistas para el estudio de la Mecánica Clásica, debían ser sustituidos por la nueva actriz principal **c**, lo que indudablemente ocasionó una **crisis científica** importante que provocó una auténtica revolución y que, evidentemente, derivó en la necesidad de introducir nuevos paradigmas; ya que las leyes físicas, en las que de una u otra forma intervengan dichas magnitudes, aun conservando la misma forma conceptual, deberían manejar distintos valores al cuantificarlas diferentes observadores entre los que hubiera movimiento relativo.

De esta revolución surgió como resultado, gracias a la genialidad de Einstein, la Teoría de la Relatividad. Ahora bien, en esta teoría es necesario distinguir dos casos completamente distintos:

a.- Que el movimiento relativo entre los posibles observadores sea una traslación rectilínea y uniforme de valor constante **u**.

b.- Que dicho movimiento relativo sea variable con el tiempo, con el espacio o con ambas cosas a la vez (y, como un caso particular, podría considerarse aquel movimiento relativo en el que un observador estuviera en reposo y el otro se moviera bajo la aceleración impuesta por la gravedad **g**).

En el primer caso, el cambio de paradigma, aportado fundamentalmente por Einstein en la Teoría de la Relatividad Especial, exige establecer las relaciones entre los valores, con que son percibidas las tres magnitudes fundamentales de la Mecánica, por cada uno de los dos observadores (el **O** solidario al sistema de coordenadas **X**, **Y**, **Z**, y el **o** ubicado en el sistema **x**, **y**, **z**), entre los que hubiera (como ya se ha dicho) un movimiento relativo definido por una velocidad rectilínea y uniforme de valor constante **u** (que vamos a suponer en la dirección **x** coincidente con **X**). Estas relaciones las determina la Teoría de la Relatividad Especial, de tal manera que, si en un proceso cualquiera observado por **O** y ocurriendo en su propio espacio, aquellas magnitudes valieran **X**, **T** y **M**, para el observador **o** los correspondientes valores para el mismo proceso serían **x**, **t** y **m**, relacionados con los primeros mediante las expresiones siguientes:

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{X - uT}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \qquad \textbf{[1]}$$

$$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{T - uX/_{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \qquad \textbf{[2]}$$

$$\mathbf{m} = \frac{\mathbf{M}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \qquad \textbf{[3]}$$

Es evidente que, en este caso, en que ni haya movimiento relativo en la dirección **y**, (coincidente con **Y**) ni en la dirección **z**, (coincidente con **Z**), los espacios en estas dos direcciones no experimentarán cambio alguno al considerarlos por uno u otro de los dos observadores; es decir:

$$\mathbf{y = Y} \qquad \textbf{[4]}$$

$$\mathbf{z = Z} \qquad \textbf{[5]}$$

Para abordar el caso particular detallado en el apartado b, pensemos en cuál sería la relación entre lo percibido, ante el mismo suceso, por un observador **O** asomado a la ventana de un edificio, y lo sentido por otro observador **o** que, habiéndose caído

al vacío desde el tejado del edificio de enfrente, descendiera respecto a **O** con una aceleración **g**. Para explicitar el contraste entre las percepciones de ambos observadores pensemos en tres casos concretos:

a.- Que el observador **o** llevara una pelota en una de sus manos y los dos observadores desearan estudiar el movimiento de la misma a partir del instante en que **o** dejara libre dicha pelota y ésta se desplazara por su cuenta, separada de dicho observador **o**.

b.- Que los dos mismos observadores pretendieran ver la velocidad con que un automóvil circulando por una plaza, horizontal y asequible al control de ambos, con una velocidad de componentes $\mathbf{V_X}$ y $\mathbf{V_Y}$ para el observador **O** asomado a la ventana. Evidentemente, por ser la plaza horizontal, $\mathbf{V_Z = 0}$.

c.- Que el observador **o** viera volar un pájaro por sus proximidades de tal manera que, para **o** durante un tiempo elemental **dt**, el citado pájaro realizara un desplazamiento de componentes **dx**, **dy, dz**.

Estamos en los tres casos ante una aplicación particular de la Teoría de la Relatividad General, mediante la que Einstein pretendió dar una interpretación relativista a la gravedad en el caso más general posible y superar, de paso, otra nueva **crisis** surgida ante dos preguntas que inquietaban al mundo científico en los inicios del siglo XX, cuando se aplicaba, sin ninguna reserva, la ley de la gravitación universal propuesta por Newton. Estas dos preguntas (a título de curiosidad y dado que ya habían inquietado al propio Newton) podrían resumirse en los siguientes términos:

a.- ¿Cuál es la velocidad con que se propaga la acción que da lugar a la fuerza de atracción entre cada par de masas?

b.- ¿Cuál es el soporte sobre el que se apoya esta acción al propagarse, incluso en el vacío, de la una a la otra de las masas?

Buscando Einstein una respuesta válida a estas preguntas, sentado frente a una ventana, en la oficina de patentes de Berna, pensó repentinamente que, mientras nuestro observador **o** cayera desde el tejado de la casa de enfrente al suelo, sus pies no se apoyaban en ningún sitio (no sentían el peso de su cuerpo) lo que equivalía a decir que no se aplicaba directamente sobre él fuerza alguna y, en consecuencia, para nuestro hombre, durante el tiempo de su caída y visto desde la ventana había desaparecido la fuerza debida a la gravedad; pero, como contrapartida, había aparecido una aceleración hacia el suelo de valor **g.**

Este pensamiento, decía él, había sido " the happiest thought of my life" y, a partir de esta idea, estableció su Principio de Equivalencia según el cual "para un observador aislado del exterior es imposible distinguir si está sometido a la acción de una fuerza exterior aplicada sobre él, o si se está moviendo con cierta aceleración".

Un observador, por ejemplo, con la espalda apoyada en la superficie interior (de radio **r**) de un tubo de acero, girando alrededor de su eje con una velocidad angular ω y totalmente aislado del exterior, no sabrá distinguir si el tubo está parado y, mediante algún dispositivo, la superficie interior del tubo le aplica una fuerza sobre su espalda de valor $\mathbf{m\omega^2 r}$ o si, por el contrario, no existe el dispositivo que le aplique dicha fuerza sobre su espalda sino que él, solidariamente con el tubo, está girando a la velocidad angular ω y, como consecuencia, está sometido a una aceleración hacia el centro de valor $\mathbf{\omega^2 r}$. Por lo tanto, y con esta interpretación relativista, la gravedad -en tanto que fuerza- está ausente en la Teoría de la Relatividad General, y se convierte en una aceleración que puede utilizarse para establecer el contraste entre las observaciones percibidas por los dos observadores que venimos considerando (el **O** en reposo y el **o** moviéndose bajo la acción de la gravedad **g**). Nótese cómo esta intuición, para pasar de la fuerza debida a la gravedad, a la aceleración correspondiente, lleva implícito considerar que la masa **inerte** (presente en la fuerza necesaria para conseguir una aceleración) y la masa **gravitatoria** (presente en la fuerza de la gravedad), sean iguales.

A analizar este problema dedicó Einstein 10 años de trabajo que concluyeron en sus famosas **Ecuaciones gravitatorias**, en las que se analiza el caso completamente general en el que **g** pueda ser variable, no solo en función de los distintos puntos del espacio, sino también a lo largo del tiempo, y que pueda actuar en cualquier dirección.

En este artículo, por intentar únicamente introducir al lector en las ideas que intervienen en el desarrollo de la Teoría de la Relatividad General, abordaremos el problema en el caso particular de considerar la gravedad constante en el espacio, independiente del tiempo y actuando en dirección vertical (**z** para el observador **o** y **Z** para el observador **O**).

Se pretende también en él establecer con cierta claridad el contraste entre lo apreciado por la Mecánica Clásica, frente a lo deducido por la Mecánica Relativista y, en este intento, se estudiarán los tres casos planteados, en primer lugar, mediante las aportaciones de Galileo y de Newton (pensando que el espacio y el tiempo fueran magnitudes absolutas) y, en segundo término, teniendo en cuenta las matizaciones relativistas de Einstein considerando que, frente a dos observadores con movimiento relativo, la única magnitud absoluta es el valor, finito e igual para ambos, de la velocidad de la luz.

En el primer caso, supongamos que transcurrido un tiempo **T**, medido por **O** desde que el observador **o** inició la caída libre, habrá transcurrido, también para este observador **o**, y según la Mecánica Clásica, un tiempo **t = T** , y la velocidad relativa de **o** respecto a **O** en la dirección **z** (coincidente con **Z**) será:

$$\mathbf{u = -gT = -gt} \qquad \textbf{[6]}$$

(recuérdese, una vez más, que para la Mecánica Clásica $\mathbf{t = T}$)

Si, en ese instante, el observador **o** (cayendo en el vacío) abre la mano y suelta la pelota, por partir ambos del mismo estado y estar sometidos a la misma aceleración, la velocidad de la pelota **v** (para **o**) será nula y, por lo tanto, conocemos:

$$\mathbf{dx = dy = dz = 0} \qquad \textbf{[7]}$$

Por el contrario, el desplazamiento elemental en ese mismo instante de la pelota, para el observador **O**, asomado a la ventana, será:

$$dX = dY = 0 \qquad [8]$$

$$dZ = -gTdT = -gtdt \qquad [9]$$

con sus velocidades respectivas:

$$V_X = V_Y = 0 \qquad [10]$$

$$V_Z = \frac{dZ}{dT} = -gT = -gt \qquad [11]$$

En el segundo caso, para ese mismo instante **T**, conocemos $V_X$, $V_Y$ y sabemos que $V_Z = 0$. Siguiendo también la Mecánica Clásica, diríamos que para el observador **o**, cayendo con la aceleración **g** en la dirección **z**, coincidente con **Z**, se cumplirá que:

$$dx = dX \qquad [12]$$

$$dy = dY \qquad [13]$$

$$dz = gTdT = gtdt \qquad [14]$$

Por otro lado, las componentes de la velocidad del automóvil que circula por la plaza, serán para el observador **o** cayendo en el vacío:

$$v_x = V_X \qquad [15]$$

$$v_x = V_Y \qquad [16]$$

$$v_z = gT = gt \qquad [17]$$

En el tercer caso, en ese mismo momento, y al seguir aplicando las transformaciones de Galileo, se cumplirá que:

$$dX = dx \qquad [18]$$

$$dY = dy \qquad [19]$$

$$dZ = dz - gTdT = dz - gtdt \qquad [20]$$

En cuanto a las velocidades y aplicando las mismas transformaciones, ocurrirá que:

$$V_X = \frac{dX}{dT} = \frac{dx}{dt} = v_x \qquad [21]$$

$$V_Y = \frac{dY}{dT} = \frac{dy}{dt} = v_y \qquad [22]$$

$$V_Z = \frac{dZ}{dT} = \frac{dz - gtdt}{dt} = v_z - gt = v_z - gT \qquad [23]$$

Para afrontar los tres mismos problemas (partiendo, evidentemente, de los mismo datos), bajo la óptica **relativista** (en la que para definir cualquier evento es necesario situarlo en el espacio y establecer el instante temporal en que se produce) deberemos trabajar en el continuo de cuatro dimensiones (el conocido **espacio-tiempo**), como la verdadera estructura en la que se desarrollan todos los sucesos en el universo e, igualmente, se manejará el concepto de intervalos, en lugar de seguir hablando de desplazamientos, sabiendo que, en dichos intervalos, se tiene en consideración no sólo la distancia elemental recorrida, sino también el tiempo infinitesimal empleado en recorrerla. Es decir, el observador **O** percibirá un proceso elemental cualquiera (en el primer caso, el desplazamiento de la pelota, en el segundo, el movimiento del automóvil, y el vuelo del pájaro, en el tercero), como un cambio infinitesimal en sus coordenadas espaciales **dX**, **dY** y **dZ**, durante una modificación también infinitesimal en su coordenada temporal **dT**, dando lugar a un intervalo dS definido mediante la expresión:

$$(dS)^2 = -(dX)^2 - (dY)^2 - (dZ)^2 + (cdT)^2 \qquad [24]$$

y, el mismo desplazamiento elemental para el observador **o**, estará definido por el correspondiente intervalo:

$$(ds)^2 = -(dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 + (cdt)^2 \qquad [25]$$

En el instante considerado en los tres casos que se vienen estudiando, por no aplicar movimiento relativo alguno (al referenciar **x**, **y, z**, **t** con **X**, **Y**, **Z**, **T**), ni en la dirección **X** (coincidente con **x**), ni en la dirección **Y** (coincidente con **y**), los desplazamientos en las direcciones **X- x** e **Y-y** cumplirán la condición de que:

$$dX = dx = 0 \qquad [26]$$

$$dY = dy = 0 \qquad [27]$$

Por otro lado, existirá entre los dos sistemas, en cada instante **T**, una velocidad relativa de valor perfectamente definido para ese instante, y en la dirección vertical, por lo que, de acuerdo con **[1]** y **[2]**, el observador cayendo en el vacío percibirá los desplazamientos verticales y los tiempos del movimiento de la pelota, del automóvil o del pájaro con valores diferentes a los percibidos por el observador apoyado en la ventana. Es decir, en cada instante, será $dZ \neq dz$, y de la misma manera $dT \neq dt$, ocurriendo, además, que estas desigualdades irán variando de un instante a otro puesto que, si la aceleración con que se desplaza **o** respecto a **O** vale **g**, la velocidad relativa de **o** respecto a **O** en el instante **T** para observador **O**, será:

$$u = -gT$$

velocidad relativa que va aumentando según va transcurriendo el tiempo **T**.

En un instante determinado $T_1$, la velocidad relativa entre el observador **o** cayendo en el vacío, y el observador **O** asomado a la ventana tendrá un valor perfectamente establecido:

$$u_1 = -gT_1$$

y, análogamente, el desplazamiento de los distintos sucesos en el espacio-tiempo de **o**, respecto al mismo observador **O**, valdrá exactamente:

$$Z_1 = -\frac{1}{2}gT_1^2$$

Para determinar el desplazamiento de la pelota o del automóvil o del pájaro vistos por **O**, a partir de los mismos desplazamientos vistos por **o**, hemos de tener en cuenta que las ecuaciones **[1]** y **[2]** se convertirán en:

$$dz = \frac{d(Z - u_1T_1)}{\sqrt{1 - u_1^2/c^2}} = \frac{dZ - u_1dT}{\sqrt{1 - u_1^2/c^2}} \qquad [28]$$

$$dt = \frac{d\left(T - u_1Z_1/c^2\right)}{\sqrt{1 - u_1^2/c^2}} = \frac{dT - \frac{u_1gT_1dT}{c^2}}{\sqrt{1 - u_1^2/c^2}} =$$

$$= \frac{dT\left(1 - u_1V_Z/c^2\right)}{\sqrt{1 - u_1^2/c^2}} \qquad [29]$$

En el primer caso, a partir de **[28]** y por ser en este primer caso $dz = 0$, se cumplirá, particularizando al instante $T_1$, que:

$$dZ = u_1 dT = -gT_1 dT \qquad [30]$$

De la misma manera, y a partir de **[29]**, ha de suceder que, en ese mismo instante $T_1$:

$$dT = \frac{\sqrt{1-u_1^2/c^2}}{1-u_1 g T_1/c^2}\,dt = \frac{dt}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}} \qquad [31]$$

Sustituyendo **[31]** en **[30]** tendremos:

$$dZ = \frac{u_1 dt}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}} \qquad [32]$$

Resumiendo, diremos que las ecuaciones **[32]** y **[31]** relacionan (para cada instante del observador **O**, y de acuerdo con la Mecánica Relativista) los desplazamientos y los tiempos del movimiento de la pelota, soltada por el observador, que cae con la aceleración **g**, y vistos por el observador que cae en el vacío, con los desplazamientos y los tiempos en el movimiento de la citada pelota, percibidos por el observador que se encuentra asomado en la ventana.

Por otro lado, el intervalo en el espacio-tiempo **X**, **Y**, **Z**, **T** de este proceso elemental del desplazamiento vertical de la pelota, de acuerdo con **[24]**, será:

$$(dS)^2 = -(dZ)^2 + c^2(dT)^2$$

y, de acuerdo con **[32]** y con **[31]**,

$$(dS)^2 = -\frac{u_1^2}{1-u_1^2/c^2}(dt)^2 + c^2\frac{1}{1-u_1^2/c^2}(dt)^2$$

y operando:

$$(dS)^2 = c^2(dt)^2 = (ds)^2$$

Ambos intervalos son iguales, independientemente del instante en que **o** hubiera soltado la pelota.

En el segundo caso, se conocen las velocidades del automóvil a juicio del observador **O** y, por caer el observador **o** con una aceleración **g**, al tener en cuenta las ecuaciones **[26]**, **[27]**, **[28]** y **[29]**, y siendo para el instante $T_1$ la velocidad relativa entre **o** y **O** de valor $u_1 = g\,T_1$, en la dirección **z** coincidente con **Z**, se cumplirá que:

$$dx = dX \qquad [33]$$

$$dy = dY \qquad [34]$$

Por otra parte, al ser $dZ = 0$

$$dz = \frac{-u_1 dT}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}} = \frac{-gT_1 dT}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}} \qquad [35]$$

Las componentes de la velocidad de nuestro automóvil, vistas por el observador, cayendo en el vacío valdrán:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dX}{dT}\frac{dT}{dt} = V_X\frac{dT}{dt}$$

Ahora bien por [29]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sqrt{1-u_1^2/c^2}}{1-u_1 V_Z/c^2}$$

y, además este caso, $V_Z = 0$, luego:

$$v_x = \sqrt{1-u_1^2/c^2}\;V_X \qquad [36]$$

De manera análoga se obtendría:

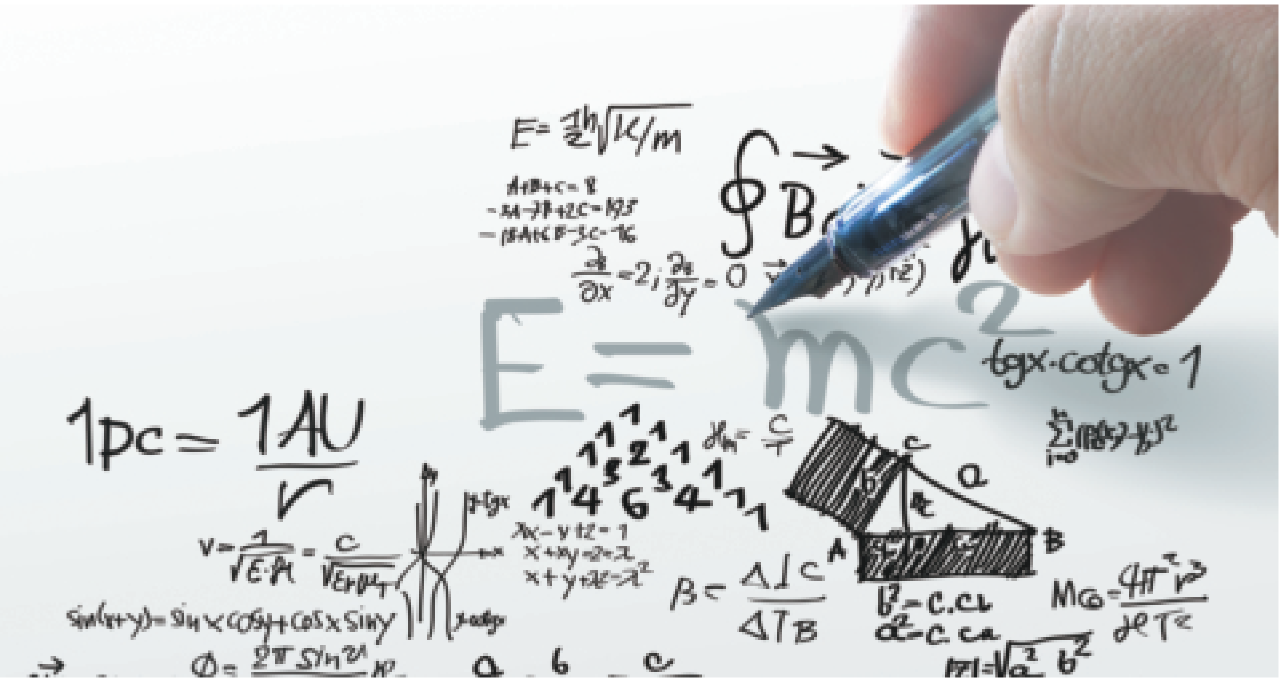
$$v_y = \sqrt{1-u_1^2/c^2}\;V_Y \qquad [37]$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{d\left(\frac{Z-u_1 dT}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}}\right)}{dT}\frac{dT}{dt} = \frac{V_Z-u_1}{\sqrt{1-u_1^2/c^2}}\frac{dT}{dt}$$

Teniendo en cuenta **[29]**:

$$v_z = \frac{V_Z-u_1}{1-u_1V_Z/c^2} \qquad [38]$$

Por ser en este segundo caso $V_Z = 0$ y $u_1 = gT_1$, tendremos:



$$v_z = -u_1 = -gT_1 \qquad [39]$$

En el tercer caso, particularizando como siempre al instante $T_1$ y teniendo en cuenta **[28]** y **[29]**, es trivial deducir que:

El desplazamiento infinitesimal del pájaro, para el observador asomado a la ventana, y durante el tiempo infinitesimal $dT$, sería tal que:

$$dX = dx \qquad [40]$$

$$dY = dy \qquad [41]$$

$$dZ = \sqrt{1-{u_1^2}/{c^2}}\; dz + \frac{u_1 dt}{\sqrt{1-{u_1^2}/{c^2}}} \qquad [42]$$

Las componentes de la velocidad del pájaro, en ese instante, para el observador asomado a la ventana, valdrán:

$$V_Z = \frac{dZ}{dT} = \frac{dz}{dt\sqrt{1-{u_1^2}/{c^2}}}\frac{dt}{dT} + u_1$$

y recordando **[38]**:

$$V_Z = \frac{v_z + u_1}{1 + {u_1 v_z}/{c^2}} \qquad [43]$$

$$V_X = \frac{dX}{dT} = \frac{\sqrt{1-{u_1^2}/{c^2}}}{1 + {u_1 v_z}/{c^2}} v_x \qquad [44]$$

$$V_Y = \frac{dY}{dT} = \frac{\sqrt{1-{u_1^2}/{c^2}}}{1 + {u_1 v_z}/{c^2}} v_y \qquad [45]$$

Puede comprobarse, como también en los casos segundo y tercero, que los intervalos para los dos observadores siguen siendo iguales e independientes de $T_1$; ya que, en cualquier instante, y sin salirnos de él, puede aplicarse la Teoría de la Relatividad Especial según la cual el intervalo, para un proceso cualquiera, es un invariante para los distintos observadores entre los que haya movimiento relativo a velocidad constante. Condición se cumple para cada instante, sea cualquiera el instante elegido.

Creemos que, mediante el análisis –a veces excesivamente tedioso– de

estos casos (en los que se ha considerado el valor de la gravedad uniforme en el espacio **x**, **y**, **z**, constante a lo largo del tiempo **t**, y siempre en la misma dirección), el lector puede interiorizar, no solo las diferencias cinemáticas entre la Mecánica Clásica y la Teoría de la Relatividad Especial, sino que también, a través de este mismo análisis, puede ir tomando conciencia de la idea feliz que motivó a Einstein para, al sustituir la fuerza de la gravedad por la oportuna aceleración, conseguir una interpretación de los efectos de la gravedad, no como hizo Newton, analizando fuerzas, sino partiendo de los cambios en la métrica, con la que el observador en el espacio-tiempo **X**, **Y**, **Z**, **T**, contemple los sucesos que se produzcan en el espacio-tiempo **x**, **y**, **z**, **t**, sometido a cualquier tipo de gravedad.

Ante este nuevo desafío, es necesario recordar que, para abordar todas las consecuencias cinemáticas y dinámicas debidas a la gravedad, perseguidas por Einstein en la Teoría de la Relatividad General, resulta imprescindible extender las reflexiones comentadas en este artículo al caso más general posible y, solo a título de ejemplo, esta generalización requiere:

a.- Generalizar el **Principio de Equivalencia** para aplicarlo cuando **g** pueda ser completamente variable, al pasar de un punto del espacio a otro, o al tener en cuenta el paso del tiempo. Es decir, considerar **g** como una función de **x**, **y**, **z**, **t**.

b.- Establecer la variación de las relaciones estudiadas en este artículo (válidas al aplicarlas para un punto particular, y en un instante determinado), al cambiar de punto o de instante.

c.- Considerar que, en el movimiento de un punto material concreto (la pelota, el automóvil, el pájaro…), interviene no solo la masa del mismo, sino también otros tipos de energía en él presentes, y, además, tener en cuenta que la ecuación **[3]** establece la variación de la masa, con la velocidad relativa entre ella y el observador que pretenda cuantificarla.

d.- Pensar que el origen de la gravedad se debe a cierta distribución de la masa-energía en el espacio-tiempo **x**, **y**, **z**, **t**, distribución que exige tener en cuenta el llamado **"tensor energético"**.

e.- Estudiar la manera, en la que la citada distribución de masa-energía, cambia la métrica con la que el observador **O** (en el espacio-tiempo **X**, **Y**, **Z**, **T**), ve el espacio-tiempo **x**, **y**, **z**, **t**, en que aquella masa-energía se mueva. Este estudio concluyó en el **tensor** $g_{ik}$, de los potenciales de Einstein.

f.- Es evidente que, implicar estos **"detalles"**, hasta llegar a establecer con precisión las ecuaciones que rigen la Teoría de la Relatividad General, conlleva las correspondientes complicaciones que justifican los 10 años de trabajo de nuestro genio, e hicieron imprescindible la colaboración de los más prestigiosos matemáticos de los inicios del siglo XX. ▮

NOTA: Los interesados pueden consultar el libro del autor "Del determinismo clásico al delirio cuántico", publicado por la Universidad Pontificia Comillas ICAI-ICADE).