

# El Efecto Mössbauer en la Relatividad Especial

Hugo A. Fernández

## INTRODUCCIÓN

Una de las predicciones más notables de la Teoría General de Relatividad fue el efecto conocido como "corrimiento al rojo" gravitatorio, indicando con ello la modificación que sufre el espectro en el rango visible, obtenido de la luz emitida por una estrella, que resulta desplazado hacia el rojo por acción del campo gravitatorio.

Aclaremos un poco más el tema. Se denomina espectro al conjunto de colores que forman un haz luminoso. Los gases a muy alta temperatura (incandescentes) tienen la particularidad de emitir y absorber solamente ciertos colores, formando un espectro de líneas que es único y representativo del gas, y que corresponde a la superposición de los espectros de los elementos químicos que lo componen. Todos los elementos de la tabla periódica tienen un espectro distinto, que los caracteriza, por lo cual podemos identificar (y cuantificar) la presencia de un determinado elemento en una sustancia analizando el espectro de la luz emitida por la sustancia en estado gaseoso.

Los espectros obtenidos de la luz proveniente de estrellas son más complejos que lo relatado, pero dan una configuración común con líneas de absorción reconocibles que permiten su análisis. La imagen que sigue muestra el espectro obtenido de la luz solar (en la parte superior) y de luz proveniente de un cluster de galaxias muy distante.



Espectro del sol vs. supercluster galaxias lejanas

Se observa que la distribución de líneas tiene el mismo patrón pero con un corrimiento notable del espectro de líneas hacia el rojo. El análisis de este resultado experimental no es simple debido a que, además del corrimiento por campo

gravitatorio, existe otro fenómeno, el efecto Doppler, que también podría producir corrimiento del espectro.

En 1842 el físico y matemático austríaco Christian Doppler (1803-1853) dio la teoría que explica el cambio de la frecuencia de una onda, medida por un observador, cuando la fuente emisora se mueve respecto del mismo.

En consecuencia, en el corrimiento del espectro podemos tener contribución de ambos efectos (gravitatorio y Doppler).

En este artículo nos limitaremos a tratar solamente el corrimiento debido al campo gravitatorio, en el marco de la Relatividad Especial.

El desplazamiento de una línea del espectro se mide por la relación:

$$z = \frac{\nu_{emitida} - \nu_{observada}}{\nu_{observada}} = \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta E}{E}$$

En 1957 el joven físico alemán Rudolf Mössbauer, mientras realizaba su tesis de doctorado en el Instituto Max Planck (Heidelberg - Alemania), descubrió el efecto que lleva su nombre, con el que se desarrolló una técnica espectroscópica de muy alta resolución que permite, entre muchas otras aplicaciones, determinar con muchísima precisión cambios insignificantes de la energía de fotones gamma.

Por este descubrimiento recibió el premio Nobel de Física en 1961, a la edad de 32 años.

Una descripción del efecto Mössbauer puede verse en:

<http://fisica.facyt.uc.edu.ve/einstein/8.doc>

Una de las aplicaciones más importante y más citada en publicaciones científicas fue el magnífico **experimento de Pound y Rebka**, realizado en 1960, para la determinación de la diferencia de energía entre fotones gamma emitidos por una misma sustancia, medidos en puntos con distinto potencial gravitatorio, cuyo resultado fue considerado una prueba de consistencia de la Teoría General de Relatividad.

El experimento fue hecho en la torre del Harvard's Jefferson Physical Laboratory, con la fuente de radiación gamma en el piso y el absorbente a una altura de  $h = 22.6 \text{ m}$ .

Un cambio de frecuencia de la radiación implica un cambio de energía de los fotones correspondientes. El resultado obtenido fue:

$$z = \frac{\Delta E}{E} = (2.57 \pm 0.26) 10^{-15}$$

La Teoría General de Relatividad predice un corrimiento relativo de energía dado por:

$$z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}} - 1$$

Siendo  $G$  la constante gravitatoria,  $M$  la masa puntual "fuente" del campo, y  $r$  la posición del observador (coordenada de Schwarzschild).

En nuestro caso debemos adaptar la relación anterior para dos puntos separados por  $22.6 \text{ m}$  sobre la superficie terrestre. Luego, desarrollando en serie para diferencias pequeñas de potencial y operando, obtenemos:

$$z = \frac{\Delta E}{E} = \frac{gh}{c^2}$$

Siendo  $g$  la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre.

Para esa altura el corrimiento calculado da  $2.5 \times 10^{-15}$ , mostrando un excelente ajuste con el resultado experimental.

La interpretación dada por la Teoría General de Relatividad se basa en el cambio que sufre la evolución temporal en presencia de masas. Suponiendo una única masa  $M$  importante, la evolución temporal comparativa en cada punto del espacio es más lenta a medida que nos alejamos de ella. De acuerdo con esta idea, un fotón emitido desde una estrella tendría una frecuencia ( $\nu = 1/T$ ) que va disminuyendo a medida que se aleja de la masa, pues su período  $T$  aumenta, dando lugar al fenómeno observable de corrimiento al rojo gravitatorio.

Debe aclararse que en este modelo las interacciones gravitatorias no existen y el fenómeno no tiene una explicación dinámica, que muchos autores utilizan, sino que resulta una consecuencia geométrica.

Como veremos a continuación, este efecto puede ser perfectamente explicado en el marco de la Relatividad Especial, aunque con una interpretación (dinámica) totalmente distinta.

## DESARROLLO

En la Teoría Especial de Relatividad el campo gravitatorio debe tratarse con igual jerarquía que cualquier otro tipo de campo físico capaz de producir efectos dinámicos sobre otros cuerpos.

Si bien desconocemos las ecuaciones generales de campo, la experiencia (Newton) muestra que en el caso estacionario el campo gravitatorio puede ser considerado conservativo y, en consecuencia, posee un potencial gravitatorio (escalar).

Asimismo, en este modelo teórico cualquier ente capaz de interactuar posee energía, masa relativista y cantidad de movimiento. En particular, los fotones son partículas que presentan las siguientes características:

<i>Cantidad de movimiento</i>	$\vec{p} = \frac{h\nu}{c^2} \vec{c}$
<i>Energía</i>	$E = h\nu$
<i>Masa relativista</i>	$m = \frac{h\nu}{c^2}$

El Principio de Equivalencia entre Masa y Energía establece que el contenido total de energía de una partícula 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 la partícula (fotón) está en presencia de un campo gravitatorio conservativo, el trabajo elemental realizado por el campo es igual a la variación de energía del fotón, resultando:

$$\begin{aligned} dE &= \vec{F} \cdot d\vec{s} = -m \nabla \phi \cdot d\vec{s} = -m d\phi = c^2 dm \\ \Rightarrow \quad \frac{dm}{m} &= -\frac{d\phi}{c^2} \end{aligned}$$

Integrando esta ecuación diferencial entre dos puntos (1 y 2) obtenemos la Ley de Conservación de la Masa (relativista) y el Potencial Gravitatorio.

$$\begin{aligned} m_1 e^{\phi_1/c^2} &= m_2 e^{\phi_2/c^2} = Cte \\ \Rightarrow \quad m e^{\phi/c^2} &= Cte \end{aligned}$$

Para el caso de un fotón emitido en el punto 1 y detectado en el punto 2, la relación anterior conduce a la expresión de la ley de corrimiento gravitatorio:

$$\begin{aligned} v_1 e^{\phi_1/c^2} &= v_2 e^{\phi_2/c^2} \\ z &= \frac{\Delta E}{E} = \frac{v_1}{v_2} - 1 \\ \Rightarrow \quad z &= e^{(\phi_2 - \phi_1)/c^2} - 1 \end{aligned}$$

Para pequeñas diferencias de potencial gravitatorio podemos desarrollar en serie la exponencial, obteniendo la misma expresión que fuera predicha con la Teoría General de Relatividad.

En nuestro caso particular resulta  $\frac{\phi_2 - \phi_1}{c^2} = \frac{gh}{c^2}$ , quedando:

$$z = \frac{\Delta E}{E} = \frac{gh}{c^2}$$

## **CONCLUSIONES**

La ley de corrimiento al rojo gravitatorio es obtenida en el marco de la Relatividad Especial como consecuencia del Principio de Equivalencia entre Masa y Energía y la Ley de Conservación entre Masa y Potencial Gravitatorio.

El mecanismo por el cual sucede el efecto es dinámico, pues se trata de pérdida de energía del fotón por el trabajo realizado por la fuerza gravitatoria. Por supuesto que si se invierten las posiciones del emisor gamma y el colector, el trabajo provoca un aumento de la frecuencia (corrimiento al azul), como se observa experimentalmente.

La expresión general hallada para  $z$  es diferente a la deducida en la Teoría General de Relatividad, aunque luego de la aproximación obtenemos el mismo comportamiento.

Esta diferencia funcional y conceptual podría dar lugar a experimentos de consistencia de contenido muy significativo y trascendente, por lo cual el tema será tratado por separado.

**Hugo A. Fernández**  
[hafernandez@fibertel.com.ar](mailto:hafernandez@fibertel.com.ar)  
**Profesor Titular de Física Moderna**  
**Universidad Tecnológica Nacional - Argentina**