

INDUCIENDO LA EXISTENCIA DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES EN EL CURSO DE FÍSICA GENERAL. UN ENFOQUE “MAXWELLIANO” DE LA GRAVITACIÓN.

INDUCING THE EXISTENCE OF GRAVITATIONAL WAVES IN THE GENERAL PHYSICS COURSE. A “MAXWELLIAN” APPROACH OF GRAVITATION.

J.J. LLOVERA[†]

Departamento de Física, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), 19390 La Habana, Cuba; fellovera@gmail.com[†]
[†] autor para la correspondencia

Recibido 16/3/2017; Aceptado 16/11/2017

PACS: Geomagnetic induction, 91.25.Wb; Gravitational waves astronomical observations, 95.85.Sz; Physics education, 01.40.-d; teaching methods, 01.40.gb

Resulta interesante el hecho de que a pesar de las similitudes que existen entre las leyes que regulan la interacción gravitacional y la electromagnética, en los textos de Física General Universitaria el tema de la gravitación ha permanecido tratado por más de un siglo mucho más limitadamente en relación al tema del electromagnetismo. Solo pocos autores y en ediciones más recientes, tímidamente incluyen algún problema a resolver en el que se plantea la analogía entre la ley de Gauss para la electricidad y una expresión de dicha ley para la gravitación [1,2].

La reciente confirmación experimental de las ondas gravitacionales y de los efectos gravitomagnéticos [3, 4] motiva a pensar en cómo introducir su tratamiento preliminar en el Curso de Física General (CFG) obviando el complejo enfoque tensorial con el que fue formulada la teoría de la gravitación por A. Einstein.

La similitud entre la ley de Coulomb para la interacción electromagnética y la denominada ley de gravitación universal de Newton permiten, aplicando un enfoque didáctico por analogía y el método de aprendizaje por descubrimiento, dar pie a formular un sistema de ecuaciones para el campo gravitatorio similares a las ecuaciones de Maxwell del cual se pueden derivar interesantes resultados didácticamente útiles. Tal analogía ya ha sido explorada por varios autores [5–7], más no ha sido considerada en los CFG.

J. C. Maxwell había identificado desde sus trabajos con el campo electromagnético la posible formulación de ecuaciones similares para el campo gravitacional [8] y por la misma época O. Heaviside en 1893 logró expresar de una forma más compacta las ecuaciones de Maxwell transformando el lenguaje de los cuaterniones en el de los vectores y operadores vectoriales y formuló por vez primera el sistema de ecuaciones de Maxwell casi tal y como hoy las conocemos incluyendo unas similares para el campo gravitacional [9].

Tales ecuaciones se pueden formular para partículas con masa en el vacío definiendo las dos magnitudes componentes

del campo gravitatorio, la gravitacional o gravitoelectrónica y la gravitomagnética [6] como

$$\nabla \cdot \vec{E}_g = 4\pi G \rho_m, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}_g = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E}_g = -\frac{1}{2c_g} \frac{\partial \vec{B}_g}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B}_g = -\frac{8\pi G}{c_g} \vec{j}_m + \frac{2}{c_g} \frac{\partial \vec{E}_g}{\partial t}. \quad (4)$$

donde \vec{E}_g es la intensidad gravitacional del campo, \vec{B}_g es la inducción gravitomagnética del campo, ρ_m es la densidad de masa, \vec{j}_m es la densidad de corriente másica, G es la constante de Cavendish y c_g es la rapidez de propagación de las ondas gravitacionales.

Operando con estas ecuaciones tal y como lo hacemos en el caso de las de Maxwell para la electrodinámica clásica podemos obtener varios resultados particulares que tienen valor didáctico para actualizar el CFG en estos temas.

Por ejemplo, transformando la ecuación (1) a su forma integral y aplicándola a una partícula masiva de masa m tomándola como centro de una superficie “gaussiana” esférica en la cual se ubica una segunda partícula de masa m' y habiendo definido (\vec{E}_g) como $(\vec{E}_g = \frac{\vec{F}_g}{m})$ se demuestra de inmediato la ley de gravitación universal de Newton en su correspondiente expresión clásica.

Un segundo ejemplo consiste en aplicar a la ecuación (4) el teorema de Stokes para el caso de campos estacionarios obteniendo una expresión equivalente a la ley de Ampère

$$\oint_C \vec{B}_g \cdot d\vec{s} = -\frac{8\pi G}{c_g} I_{m_{contenida}}, \quad (5)$$

que puede servir como fundamento para poner a los estudiantes en conocimiento del fenómeno gravitomagnético

y comentarles acerca de su reciente comprobación experimental a pesar de ser un efecto ultra débil a partir de los experimentos denominados Gravity Probe A y B (GP-A y GP-B) [4] que tuvieron como fin detectar y medir el ligerísimo efecto del gravitomagnetismo en la rotación espinorial de cuatro sensibles giróscopos ubicados en un satélite orbitando a 650 km de altura alrededor de la Tierra cruzando sobre los polos terrestres acusando el efecto denominado “de arrastre del sistema de referencia espacial” por la deformación del espacio-tiempo con una muy pequeña incertidumbre.

Un tercer ejemplo de cómo se pueden emplear estas ecuaciones para actualizar el CFG en cuanto a los más recientes resultados obtenidos en el estudio de la gravitación consiste en obtener de las mismas las ecuaciones de la onda gravitacional para el campo gravitacional débil libre ($\rho_m = 0$ y $\vec{j}_m = 0$).

En este caso operando tal y como lo hacemos alternativamente en las ecuaciones de Maxwell conocidas pero en este caso con las ecuaciones de los rotacionales de \vec{E}_g y \vec{B}_g respectivamente y aplicando a estas el rotacional se pueden obtener las ecuaciones de onda correspondientes

$$\nabla^2 \vec{E}_g = \frac{1}{c_g^2} \frac{\partial^2 \vec{E}_g}{\partial t^2}, \quad (6)$$

$$\nabla^2 \vec{B}_g = \frac{1}{c_g^2} \frac{\partial^2 \vec{B}_g}{\partial t^2}. \quad (7)$$

Lo cual permite hacer referencia a su reciente constatación experimental después de haber sido predichas por A. Einstein desde la primera década del siglo pasado en su teoría general de la relatividad.

Al tratar el tema se hace imprescindible destacar el hecho de que esta analogía entre ambas interacciones, la gravitacional y la electromagnética, solo es posible hacerla en el caso límite de campos débiles (espacio cuasiplano) y a velocidades no relativistas debido a que los fundamentos teóricos que en esencia explican estos dos tipos de interacción difieren [10], sin embargo, esto a su vez se convierte en una oportunidad para insistir con los estudiantes en los límites de validez de las teorías físicas y su desarrollo y motivarlos por el estudio de la gravitación.

Para reafirmar que existe una diferencia esencial entre ambos tipos de interacción basta con destacar a los estudiantes que en tanto una partícula de masa m , aun sin estar electrizada, se mueve bajo la acción del campo gravitacional uniforme débil en la superficie de nuestro planeta con la misma aceleración independientemente cualquiera sea su masa, una partícula electrizada con cantidad de carga eléctrica q se mueve bajo la acción de un campo eléctrico de intensidad uniforme pero en cambio su aceleración si depende de su carga.

Siendo la interacción gravitacional la que más se evidencia en la vida cotidiana, su tratamiento en los cursos de Física General se ha mantenido prácticamente invariable desde hace muchos años concretándose a presentar los efectos estáticos de la gravitación y tratando de manera muy elemental los resultados de la teoría general de la relatividad.

Si bien la teoría general de la relatividad resulta matemáticamente complicada para ser abordada en estos cursos, la analogía que existe entre el campo gravitatorio y el campo electromagnético en el límite de campos débiles permite tratar los fenómenos gravitacionales (bien pudieran denominarse gravitodinámicos) de modo similar a como se tratan los fenómenos electrodinámicos lográndose, además de ampliar y actualizar los conocimientos de los estudiantes acerca de los fenómenos gravitatorios; apreciar elementos de analogía entre estos dos tipos de interacciones fundamentales de la naturaleza contribuyendo a formar en el estudiante la concepción científica del Universo así como a ponerlos al día acerca de los más recientes descubrimientos en el estudio de la gravitación y consolidar el sentido físico y la interpretación de las ecuaciones de Maxwell para el electromagnetismo.

En un futuro cercano los textos de Física General deberían retomar esta similitud haciendo honor a los trabajos fundacionales de físicos de la talla de J. C. Maxwell, O. Heavyside y A. Einstein quienes desde finales del siglo XIX y principios del XX habían llamado la atención sobre estos temas.

REFERENCIAS

- [1] D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane, Física Vol. II tomo I, 4ta Ed. (John Willey & Sons., 1992).
- [2] H. D. Young y R. A. Freedman, Física Universitaria con Física Moderna Vol. 2, 13th Ed. (Pearson, México, 2013).
- [3] B.P. Abbott *et al.*, Phys. Rev Lett. **116**, 061102.
- [4] Everitt, *et al.*, Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity, Phys. Rev. Lett. **106**, (2011).
- [5] B. Mashhoon, F. Gronwald, and H.I.M Lichtenegger, Lecture Notes in Physics **562**, 83 (2001)
- [6] M. P. Hobson, G. P. Efstathiou, A. N. Lasenby, General Relativity: An Introduction for Physicists, 1ra Ed. (Cambridge University Press, 2006).
- [7] C. Moreno, et. al., Lat. Am. J. Phys. Educ. **3**, (2008).
- [8] J. C. Maxwell, Phil. Trans. **155**, 492 (1865).
- [9] O. Heavyside, The Electrician, Part I, 31, 281-282 (1893)
- [10] A. Tartaglia and M. L. Ruggiero, Eur. J. Phys. **25**, 203 (2004).