

## Una Aplicación Cotidiana de la Relatividad General

Julio César López-Domínguez\* y Miguel Sabido\*

### ABSTRACT

In this article we present an everyday application of one of the fundamental theories of nature, general relativity. We give a brief revision of how electrodynamics without any apparent application ends up being decisive in every day life. Finally we present how the effects of general relativity are fundamental for accuracy of the global positioning system (GPS).

### RESUMEN

En este artículo presentamos una aplicación cotidiana de una de las teorías fundamentales de la naturaleza, la relatividad general. Comenzamos por una breve revisión de cómo la electrodinámica sin aparente aplicación práctica en el siglo XIX, termina siendo indispensable en la vida cotidiana. Finalmente presentamos como los efectos de la relatividad general son fundamentales para la precisión del sistema de posicionamiento global (GPS).

Recibido: 15 de Junio de 2009  
Aceptado: 23 de Septiembre de 2009

Uno de los grandes dilemas de la investigación en ciencia básica y en particular de la física teórica es la aplicabilidad del conocimiento generado. En las áreas tradicionales de la física los resultados obtenidos teóricamente han dado lugar a grandes avances tecnológicos que han moldeado el mundo en que vivimos, sin embargo, en el área de gravitación las contribuciones no son tan obvias.

Un ejemplo clásico en que la aplicación inmediata de la teoría no estuvo presente pero que a futuro provocó un gran cambio es el electromagnetismo. Esta teoría fue sintetizada a finales del siglo XIX por el físico James C. Maxwell quién escribió de manera formal y rigurosa todo el conocimiento relacionado con los fenómenos electromagnéticos conocidos hasta esa época. Si analizamos la aplicabilidad de dicho conocimiento en el contexto de la vida de finales del siglo XIX, el ejercicio de Maxwell fue un simple análisis teórico de los estudios desarrollados experimentalmente por otros investigadores (anteriores y contemporáneos). La formulación de Maxwell permitió un mejor entendimiento de los fenómenos electromagnéticos teniendo como uno de sus logros más notables el establecimiento de la naturaleza electromagnética de la luz, sin embargo, una aplicación a la vida cotidiana no se vislumbró en esa época. Recuerde el lector que no había transmisión de electricidad, la iluminación nocturna era en base a velas, lámparas de aceite, etc.

Situándonos junto al lector en la época de Maxwell hagamos la siguiente pregunta: ¿Para qué nos sirve la teoría de Maxwell? ¿Qué beneficios y qué aplicaciones tiene en la vida cotidiana? Es fácil imaginar una serie de debates entre los diferentes sectores de la sociedad como: gobernantes, académicos y comerciantes sobre la utilidad de esta nueva ciencia. La respuesta a esta pregunta aún para el mismo intelecto de Maxwell quedaba fuera de su imaginación.

Regresando al siglo XXI la respuesta a dicha pregunta es trivial toda la vida moderna se basa en la aplicación de la teoría de Maxwell; electricidad, bombillas eléctricas, computadoras, automóviles y muchos más. Siendo atrevidos, pedimos al lector como ejercicio mental hacer una lista de enseres tecnológicos que utilizamos en nuestra vida que no usen en alguna medida electricidad y/o magnetismo.

#### Keywords:

Gravitation; General relativity.

#### Palabras clave:

Gravitación; Relatividad General.

Al igual que este ejemplo podemos mencionar varios casos, sin embargo nuestro propósito no es listarlos, sino sensibilizar al lector de que la ciencia básica a pesar de no tener una aplicación inmediata a la vida cotidiana eventualmente se incorporará paulatinamente.

\* Departamento de Física, División de Ciencias e Ingenierías (DCI), Campus León, Universidad de Guanajuato, C.P. 37150, León Guanajuato, México. Correo electrónico: jlopez@fisica.ugto.mx y msabido@fisica.ugto.mx

Pasemos ahora al tema que nos interesa: relatividad general.

Para entender la importancia y el origen de dicha teoría tenemos que remontarnos a las primeras experiencias del hombre, la simple observación de que las cosas caen.

Las primeras ideas sobre la atracción gravitacional entre los cuerpos puede remontarse al Obispo Nicolás Oresme 400 años antes de Newton, quien especuló que si existieran otros mundos en el universo la materia situada cerca de ellos sería atraída hacia su centro. Posteriormente las ideas de Copérnico y las observaciones de Tycho Brahe llevan a Kepler a establecer leyes que rigen el movimiento de los cuerpos del sistema solar.

Pero fue Newton quién en realidad entendió el problema de la atracción entre cuerpos, describiéndolo cualitativa y cuantitativamente en su teoría de la gravitación universal. La síntesis de Newton fue establecer que la fuerza que nos mantiene sobre la superficie de la Tierra es la misma que mantiene a los planetas en sus órbitas. Posteriormente la teoría Newtoniana de la gravedad permitió grandes avances en el conocimiento, prediciendo la existencia de nuevos objetos en el sistema solar (por ejemplo: Urano, Neptuno, Plutón, etc.), permitiendo al hombre llegar a la Luna, poner satélites en órbita y enviar sondas que han llegado a los confines del sistema solar.

Es obvio que estas aplicaciones nunca fueron vislumbradas por Newton ni por la mayoría de los grandes pensadores de la época. Pero el conocimiento generado fue indispensable para obtener dichos logros y debido a esto nadie pone en tela de juicio la importancia de la teoría Newtoniana.

El desarrollo de la teoría de Maxwell y de Newton estuvo cimentado en observaciones y resultados experimentales que guiaron sus esfuerzos teóricos, por lo que podríamos argumentar que eventualmente se daría su conexión con la vida cotidiana.

El caso de relatividad general es único en la física. Surge de un ejercicio puramente teórico de Albert Einstein, quién logró unificar las ideas de relatividad con gravedad. Elevando el status del espacio-tiempo a un ente dinámico cuya curvatura dicta las interacciones gravitacionales. Esta nueva visión de la gravedad es totalmente diferente a la desarrollada por Newton en la que la idea central es la noción (aborrecida por algunos físicos de los siglos anteriores al XIX) del campo de acción a distancia.

En sus orígenes la relatividad general no contó con la aceptación general de la comunidad científica, pues carecía de sustento experimental, era matemáticamente complicada y sólo un pequeño grupo de personas en el mundo lograba comprenderla.

No fue hasta 1919, cuatro años después de ser publicada la teoría de la relatividad general, que con las observaciones de Eddington se puso por primera vez a prueba esta teoría, confirmando la predicción de Einstein del doblamiento de la luz de una estrella lejana al pasar cerca del Sol. Este resultado dio sustento y aceptación a la teoría Einsteiniana de la gravedad, posteriormente otras predicciones relativistas fueron confirmándose, por ejemplo: el hecho de que el tiempo se modifique en la presencia de un campo gravitacional, al igual que un resultado previo respecto a la modificación del tiempo al encontrarse en movimiento.

Como hemos mencionado la relatividad general fue un esfuerzo meramente intelectual de una sola persona, su confirmación experimental no ha sido tan espectacular como en otras áreas de la física moderna por lo que la disyuntiva planteada al principio de este texto es más fuerte. Entonces, nos hacemos la pregunta que ha aparecido constantemente, ¿Tiene aplicaciones la relatividad general en la vida cotidiana? O tal vez una versión más suave de la misma pregunta, ¿Ha impactado la relatividad general algún aspecto de la vida diaria?

Nosotros como físicos teóricos defenderíamos la teoría argumentando los grandes aportes que ha dado al entendimiento de la naturaleza: el origen de la gravedad, la explicación del universo a gran escala y otra serie de fenómenos astrofísicos, sin embargo la existencia de un producto tangible como en el caso de Maxwell no es clara.

En los párrafos restantes presentaremos un par de efectos que por sí solos son de interés para los físicos, son resultados que implican una modificación de nuestra concepción del espacio-tiempo, pero que en conjunto han llevado a la que posiblemente sea la primera (y esperemos no la única) aplicación de la relatividad general que derivó en un producto que impacta nuestra vida diaria.

Comenzaremos con dos efectos que podrán parecer mágicos para el lector pero que han sido confirmados experimentalmente.

En 1905 A. Einstein publicó la que sería conocida como teoría de la relatividad especial, dicha teoría no toma en cuenta la gravitación, sin embargo unifica el espacio y el tiempo como un solo ente

llamado *espacio-tiempo*. En este esquema el tiempo fluye más lento conforme más rápido te mueves. Es probable que alguno de los lectores haya oído (o visto en alguna película) sobre la paradoja de los gemelos, donde dos gemelos son separados, uno se queda en la tierra y otro viaja a una estrella a una velocidad cercana a la de la luz, en consecuencia el gemelo que se queda en la Tierra ha envejecido más que el que estaba en la nave. El efecto es explicado por la teoría ya que predice que el tiempo del gemelo en movimiento transcurre más lento que el del gemelo que se encuentra en la Tierra. Este fenómeno ha sido comprobado experimentalmente comparando dos relojes atómicos (que son lo más precisos que se han construido), uno estacionario en la Tierra mientras el otro se mueve en jet. El reloj que se encontraba en el jet se retrasó con respecto al reloj que estaba estacionario en la Tierra, esto es algo muy interesante, pero ¿Qué aplicaciones tiene?

El otro efecto que nos interesa tiene que ver directamente con relatividad general, es decir, con la teoría de la gravedad<sup>1</sup>. Resulta que la gravedad también afecta al tiempo, por lo que uno esperaría que un reloj en la superficie de la Tierra de una medición diferente a uno que se encuentra a gran altura o en órbita alrededor de la tierra. Este efecto ha sido comprobado experimentalmente comparando dos relojes atómicos, uno sobre la superficie de la tierra y otro en un cohete en órbita, este es un efecto interesante pero aparentemente sin aplicación práctica.

Antes de establecer la practicidad de lo mencionado en los párrafos anteriores pensemos que uno viaja en un avión comercial. ¿Cómo determina el piloto su posición en la Tierra?, ¿Cómo lo hace un buque-tanque en el mar, o inclusive un automovilista perdido en una gran urbe? Recientemente la respuesta a estas interrogantes es un interesante dispositivo (que se encuentra al alcance de todos) conocido como sistema de posicionamiento global (GPS<sup>2</sup> por sus siglas en inglés). Este sistema permite mediante el uso de un dispositivo portátil, determinar la posición en la Tierra con una exactitud de unos cuantos metros y con modelos más sofisticados (de uso militar) de unos cuantos centímetros.

Este sistema fue comisionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y consiste en 24 satélites que orbitan alrededor de la tierra a una altura aproximada de 20,000 km del suelo y que tienen una velocidad orbital de 14,000 km por hora, cada satélite tiene un reloj atómico con una precisión de 1 nanosegundo (esto quiere decir que mide con exactitud de 1

en mil millones de segundo). Para que dicho sistema funcione de manera apropiada la precisión del reloj debe ser de 20 a 30 nanosegundos, si dicha precisión no se mantiene durante la órbita del satélite la posición en la Tierra ya no podrá determinarse con la exactitud deseada.

Veamos ahora que le pasa a un reloj que tiene precisión de 1 nanosegundo al encontrarse en las condiciones que están los satélites.

Recordemos que el reloj dentro del satélite se verá alterado en su medición del tiempo por los dos efectos de la relatividad, verifiquemos si dichos cambios son relevantes.

Ya mencionamos que los relojes en el satélite se mueven a una velocidad de 14,000 km por hora, la relatividad especial predice que un reloj en esas condiciones se retrasaría 7,2 microsegundos por día (7,2 segundos en un millón de segundos) con respecto a uno en reposo en la superficie de la Tierra.

Además los satélites se encuentran a 20,000 km de la superficie de la Tierra por lo que esperaríamos discrepancias entre el tiempo medido por los relojes en órbita y los que se encuentran en la Tierra. El cálculo basado en relatividad general predice que un reloj en dichas condiciones se adelantaría 45,9 microsegundos por día.

Una anécdota interesante sobre dicho efecto proviene de la época en que se lanzó el satélite NTS-2 (23 de junio de 1977) que contenía un reloj atómico de Cesio, teóricamente se había predicho que los relojes en órbita requerían correcciones relativistas para que estuvieran sincronizados con los que se encontraban en la Tierra. Sin embargo, había incertidumbre sobre si las predicciones de la relatividad general eran efectos reales que deberían tomarse en cuenta, por esa razón se incorporó un dispositivo que modificaría el reloj si las predicciones teóricas fueran necesarias. Después de que el reloj de Cesio funcionó durante 20 días se activó el dispositivo ya que la discrepancia entre el reloj terrestre y el reloj en órbita fue el 99% de lo predicho por relatividad general.

Si juntamos ambos efectos 45,9 microsegundos que se adelanta menos los 7,2 que se retrasa, significa que cada día los relojes en los satélites se adelantan 38,7 microsegundos con respecto a los relojes en la Tierra, esto es un discrepancia de 38,700 nanosegundos. Sabemos que la precisión necesaria para los relojes del sistema GPS debe ser de 20~30 nanosegundos. Si no consideramos los efectos de relatividad, el sis-

<sup>1</sup> Existen otras teorías para describir el campo gravitacional las cuales en cierto límite coinciden con la relatividad general.

<sup>2</sup> Global Positioning System

tema GPS no podría funcionar. Puede deducirse que la determinación de la posición utilizando el sistema GPS sin considerar los efectos relativistas comenzaría a dar resultados erróneos que podrían ser de kilómetros en algunas cuantas horas. En pocas palabras, el sistema GPS un día nos daría una posición para nuestra casa en Guanajuato y un mes después podría determinar como la posición de nuestra casa un lugar tan lejano como Ensenada.

A un siglo de la formulación de la teoría de la relatividad de Einstein, encontramos la primera aplicación práctica y que influye en varios aspectos de nuestra vida.

Reflexione el lector de todo el conocimiento científico que no parece tener aplicaciones en la vida diaria y ahora tome en cuenta lo plasmado en estos párrafos e imagine el potencial de dicho conocimiento para modificar el mundo en que vivimos. Finalmente recuerde que los ejemplos presentados en este texto dieron lugar a grandes cambios que jamás fueron vislumbrados por los creadores de las teorías ni por sus contemporáneos, por lo que es plausible que este conocimiento dé lugar a un futuro que ni siquiera podemos imaginar.

## REFERENCIAS

- Davidson, R.C. (2009), "The realities of Einstein's Relativity and our GPS System", [www.brighthub.com/science/space/articles/32969.aspx](http://www.brighthub.com/science/space/articles/32969.aspx).
- Hetch, E. (1987), "*Física en Perspectiva*", Addison-Wesley Iberoamericana.
- Jackson, J. D. (1998), "*Classical Electrodynamics*", J. D. Jackson, Wiley 3rd edition
- Pogge, R.W. (2009), "Real World Relativity: The GPS Navigation System", course lectures, [www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/gps.html](http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/gps.html).
- Alley, C., (1983), "Proper time experiments in gravitational fields with atomic clocks, aircraft, and laser light pulses", in Meystre, P., and Scully, M.O., eds., *Quantum Optics, Experimental Gravitation, and Measurement Theory, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Quantum Optics and Experimental General Relativity*, August 1981, Bad Windsheim, Germany, vol. 94 of NATO Science Series: B, 363–427, (Plenum Press, New York, U.S.A.).
- Buisson, J.A., Easton, R.L., and McCaskill, T.B., (1978), "Initial Results of the NAVSTAR GPS NTS-2 Satellite", in Rueger, L.J. et al., ed., *9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting*, Proceedings of the meeting, held at NASA Goddard Space Flight Center, November 29 – December 1, 1977, 177–200, (Technical Information and Administrative Support Division, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, U.S.A.).
- Neil Ashby, (2003), "Relativity in the Global Positioning System", *Living Rev. Relativity* 6..