

Cien **años** de la TEORÍA de la RELATIVIDAD **GENERAL**

Entrevista al doctor Gerardo Torres del Castillo

Leopoldo **Noyola**

En 1931 Albert Einstein y Charlie Chaplin se reunieron con motivo del estreno de la película *Luces de la Ciudad*. El breve intercambio de palabras fue captado para la historia: “Lo que he admirado siempre de usted es que su arte es universal; todo el mundo le comprende y le admira”, expresó Einstein al cineasta. Chaplin respondió: “Lo suyo es mucho más digno de respeto; todo el mundo le admira y prácticamente nadie le comprende”. ¿Si la ley de la gravedad de Newton puede ser explicada con manzanas por qué la Teoría de la Relatividad General de Einstein resulta tan difícil de comprender?

En noviembre de 2015 se cumplieron cien años de la presentación de la Teoría de la Relatividad General en la Sociedad Prusiana de la Ciencia. Habían pasado casi diez años desde que Einstein la concibió pero en el intermedio hubo muchos asuntos que le impidieron presentarla formalmente.

¿Qué fue lo que propició en la ciencia europea esta revelación que cuestionaba la inamovible teoría de la gravedad de Newton? Se dice que la Teoría de la Relatividad es uno de los grandes logros de la historia de la humanidad, pero no se acaba de comprender cómo es que cambia para siempre la forma que tenemos de entender el tiempo y el espacio: a simple vista vemos seres humanos en los que nada parece haber cambiado; más aún, perviven fundamentalismos arcaicos y costumbres demasiado antiguas que anteceden a Newton. Y la teoría de la relatividad permanece ajena a todo ello.

Nos acercamos a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP con la intención de desvelar algunas de las grandes lagunas que existen en los simples mortales a propósito de la centenaria teoría. Caímos en blandito cuando uno de los contados especialistas nos concedió una entrevista sin miramientos a un titubeante cuestionario que logré elaborar tras grandes sacrificios mentales.

Gerardo Torres del Castillo, egresado de la Escuela de Ciencias Físico Matemáticas de la BUAP, obtuvo su doctorado en física en el Instituto Politécnico Nacional y realizó una estancia posdoctoral en la Universidad de Oxford, becado por el gobierno británico; en 1991 recibió la Medalla Académica otorgada por la Sociedad Mexicana de Física. Su campo es la Física Matemática, particularmente la Relatividad General.

A los ojos del público común, la Teoría de la Relatividad General (TRG) sigue siendo lo suficientemente compleja para entenderla, sin embargo ha incidido a lo largo de esos cien años en más de una forma de mirar y comprender el mundo. ¿Cuál es la importancia de la TRG en la física moderna, qué es lo que puede decirse sobre ella hoy en día?

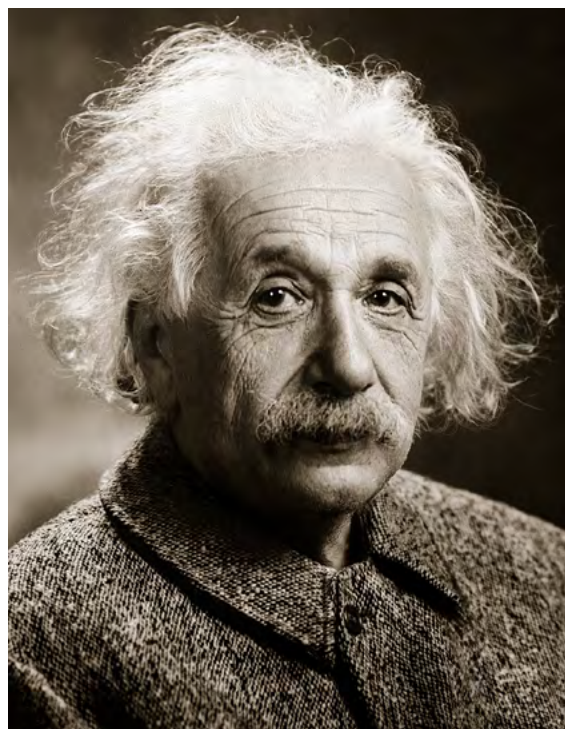
La importancia de la Teoría de la Relatividad General en la física moderna es variada. Primero que nada la teoría de la relatividad general es, básicamente, una teoría acerca de la gravitación. Es decir, cuando Einstein estableció la teoría especial en 1905 se dio cuenta de que en esa descripción no incluía al campo

gravitacional y entonces él y otros investigadores de la época se dieron a la tarea de buscar una teoría que viniera a sustituir a la de Newton, que por cierto funcionaba (y funciona) bastante bien. De hecho, en esa época se tenía una confianza total en las predicciones de las teorías de Newton, pero estas no tomaban en cuenta la unidad de espacio-tiempo que se deduce de la relatividad especial. Esta nueva teoría no fue concebida porque la teoría gravitacional de Newton tuviera defectos; es decir, en la física ocurre que las teorías tienen un cierto dominio de aplicación y hay situaciones en que no funcionan bien, y es ahí entonces donde hay que buscar una nueva teoría que explique ese fenómeno que la antigua teoría no cubre. Entonces, aunque no había mayores problemas con la teoría de Newton, la única limitación o inconveniente era que no tomaba en cuenta la unidad de espacio y tiempo.

¿En qué consistía esa debilidad en la teoría de Newton?

Cuando Einstein terminó su teoría en noviembre de 1915, algo que le había convencido de que estaba en el camino correcto era la posibilidad de explicar el único

© Oren Jack Turner, Albert Einstein, Princeton, N.J., 1947.



detalle que la teoría de Newton no era capaz de explicar. El punto es este: Mercurio tiene un movimiento que no se explica con la teoría de Newton; al observar el movimiento de Mercurio se descubrió, más o menos desde 1840, que no correspondía a lo que decía la teoría de Newton; tomando en cuenta los planetas conocidos, había un movimiento que no encajaba perfectamente en la teoría, lo que llevó a la suposición de que existía más cerca del Sol algún otro planeta que producía esas perturbaciones, pero no se encontró ninguno. Entonces esa duda quedaba como una mancha; la única, prácticamente, en la teoría de Newton: un movimiento que no se explicaba. Eso fue lo que Einstein quería dilucidar. Tuvo, pues, dos motivaciones: su esperanza era que una nueva teoría sí fuera capaz de, primero, tomar en cuenta la unidad espacio-tiempo y, segundo, explicar este fenómeno que no era entendible en Newton.

¿Cómo entender la unidad espacio-tiempo?

Lo que nos revela la TRG es que el espacio y el tiempo no son algo rígido, como se suponía hasta 1907, sino que el espacio-tiempo es algo flexible, la materia influye sobre el espacio-tiempo y le produce curvatura. La presencia de la materia deforma al espacio y el tiempo y, a su vez, esas deformaciones determinan cómo se mueven los objetos en el espacio, como marchan los relojes, y entonces hay aquí una interrelación entre la materia y el espacio-tiempo. Eso es un resultado conceptualmente importante porque hasta antes de que se estableciera esta teoría se tenía la idea de que el tiempo y el espacio eran cosas separadas y rígidas; entonces, el resultado es que no hay tal rigidez sino que hay esta ligera maleabilidad del espacio-tiempo.

¿Ligera?

Ligera, porque en condiciones normales estamos hablando de masas como la de un planeta, como la Tierra, e inclusive de una estrella como el Sol, que es 330 mil veces más pesado que la Tierra, donde las deformaciones que producen por el espacio y el tiempo son mínimas, de tal manera que en la mayoría de las circunstancias esa curvatura no es algo importante,

observable, medible. Es muy raro que uno tenga que tomar en cuenta esas deformaciones del espacio y del tiempo, solamente en casos muy extremos, como el caso de los satélites de GPS. Ahí sí se necesita tomar en cuenta la relatividad general, pero a nivel de nuestro entorno podemos seguir pensando que el tiempo y el espacio son prácticamente algo rígido. Es decir, la deformación que produce la Tierra, a pesar de los 5,900 trillones de toneladas que tiene de masa, produce una curvatura que para casi cualquier propósito es insignificante. Pero aunque sea muy pequeña, el hecho de que exista, de que haya una posibilidad de que el espacio y el tiempo se distorsionen, es lo que tiene una importancia grande como concepto. Pero si estamos pensando en lanzar una sonda espacial a Plutón, ahí la mecánica de Newton funciona casi perfectamente, no se necesita la relatividad, ni siquiera la especial, ni la general; es decir, sus efectos son muy muy pequeños, y normalmente no los notaríamos.

Explíquenos más la relación de la Relatividad con el GPS

El problema del GPS (problema entre comillas), es que ahí se necesita medir el tiempo con una enorme precisión, porque de no ser así no podríamos determinar la posición en la superficie terrestre con la precisión que interesa. Es decir, si no se tomara en cuenta el hecho de que aquí en el suelo el tiempo no transcurre con la misma velocidad que a 100 kilómetros de altura, esa diferencia, aunque sea de millonésimas de segundo —o menos—, produciría errores de muchos metros en la determinación de la posición, por lo que es necesario aplicar ahí la TRG. La gente lo usa aunque no esté muy consciente de ese hecho.

O mejor: aunque esté completamente inconsciente...

Lo mismo pasa con una computadora o con un teléfono celular, uno está utilizando circuitos integrados cuyo funcionamiento requieren de la física cuántica, pero uno no necesita saberlo. Con saber marcar un número es suficiente.

¿Por qué tarda Einstein diez años en presentar su teoría?

Bueno, la razón es que eso que podríamos llamar el periodo de gestación de la TRG fue un periodo de intenso trabajo en el que la vida personal de Einstein no estaba pasando por una época sencilla como para poder dedicarse enteramente a estos temas; es decir, tuvo un rompimiento de su primer matrimonio y cosas así, se gesta también la Primera Guerra Mundial y ciertamente situaciones que no eran las más adecuadas para este trabajo. Hubo varios detalles, pues, acontecimientos o circunstancias que hicieron que el tiempo para llegar a esta teoría final fuera relativamente largo. Además, Einstein estaba casi solo en este esfuerzo, a diferencia de lo que ocurrió con la relatividad especial.

¿Qué tan solo estaba Einstein en esta etapa del desarrollo de su teoría?

En el caso de la relatividad general eran relativamente pocos los físicos de esa época que estaban interesados en el tema; bueno, como decía antes, el hecho de que la teoría de Newton funcionaba y sigue funcionando suficientemente bien para la mayoría de los propósitos, tampoco hacía ver a una nueva teoría como algo sumamente importante. A diferencia de lo que ocurrió, por ejemplo, con la física cuántica. La física cuántica atrajo la atención de muchísimos físicos, más o menos en ese periodo —entre 1900 y 1925—, cuando se desarrolló la mecánica cuántica. Entonces, la gente estaba ocupada en otros temas que parecían mucho más claramente definidos, en los que sí se veía un problema muy importante a atacar; en cambio, la gravitación, pues, no parecía tan relevante y Einstein era prácticamente el único que se había dedicado a buscar esta nueva teoría. Uno de los factores que también dificultó su desarrollo fue que en esta nueva teoría se requiere de un tipo de formalismo matemático que en las demás teorías de la física no es necesario, entonces ese fue un punto importante.

¿El formalismo matemático serían matemáticas más elaboradas?

Algo así. Por ejemplo, en el caso de la física cuántica, aunque fueron nuevos los conceptos que se tuvieron que introducir, se pudo reutilizar prácticamente la misma matemática de los siglos anteriores, sin cambios relevantes; cambiaron nada más los conceptos porque las matemáticas eran prácticamente las mismas. Diferente al caso de la relatividad general, al tener que hablar de un espacio-tiempo que está deformado, que además es curvo, requiere del uso de lo que se conoce en matemáticas como geometría riemanniana (por Bernhard Riemann, 1826-1866); es una herramienta que no se empleaba en la física; o sea, los físicos no tenían necesidad y, por lo mismo, antecedentes de su manejo. Entonces Einstein mismo tuvo que aprender sobre la marcha esos conocimientos que los matemáticos habían estado desarrollando desde la segunda mitad del siglo XIX, para eso contó con la ayuda de un excompañero de estudios, Marcel Grossmann, y poco a poco fue aprendiendo el lenguaje matemático, al mismo tiempo que desarrollando los conceptos físicos que eran necesarios. Entonces esos factores pueden explicarnos el prolongado periodo de elaboración. Primero, no había mucho interés en el tema; segundo, no había gran cantidad de observaciones que pudieran servir de guía para establecer la teoría. Diferente a lo que ocurrió con la mecánica cuántica, en ella había observaciones desde principios del siglo XIX que todavía a principios del XX no tenían explicación, entonces ahí había muchos datos experimentales que sirvieron de guía para establecer la nueva teoría. En cambio, en el caso gravitacional, solamente había un efecto que la teoría de Newton no explicaba y ya, no había más observaciones que pudieran servir de guía.

¿Cuándo termina esa soledad?, ¿en qué momento la atención del mundo se vuelca hacia Einstein y lo convierte en un científico universal?

Aquí es donde entra ese famoso eclipse de Sol de 1919, bastante cerca de 1915, cuando estableció finalmente la teoría; el mismo Einstein había sugerido que se buscara por parte de los astrónomos la desviación de la luz en un eclipse solar; era la forma más sencilla de demostrarlo en ese momento. Entonces fue algo que se aprovechó y, de hecho, fue lo que le dio fama mundial a Einstein, puesto que antes de fines de 1919 Einstein era

desconocido para el público en general. En 1919 se observó directamente el hecho de que la luz, cuando pasa cerca de un objeto masivo, se desvía. Era importante hacerlo durante un eclipse total de Sol porque la masa del Sol es la más grande del sistema solar, es ahí donde se pueden producir efectos más fácilmente observables, a pesar de lo cual tampoco resulta fácil, sobre todo con la tecnología de la época. Hoy en día, gracias a los telescopios en tierra y los espaciales, se puede observar todos los días el hecho de que la luz se desvía cuando pasa cerca de masas grandes en el espacio; es un hecho cotidiano que cuando observamos galaxias distantes se tiene ese efecto, es una herramienta que los astrónomos emplean en sus observaciones. Pero en 1919 ni siquiera se reconocía el hecho de que las galaxias eran objetos distantes, o sea, efectivamente el conocimiento astronómico era bastante limitado en esa época; el *Big Bang* no era una teoría completamente aceptada.

Aun cuando la comprobación sobre la desviación de la luz estelar fue posible en 1919, esta teoría entra tardíamente a la corriente de la física teórica y la astrofísica desarrolladas entre 1960 y 1975, llamada “la edad de oro de la relatividad general”, cuando se comprende el concepto de agujero negro, se identifican objetos como los cuásares y, en general, se hacen pruebas que confirman el poder predictivo de la teoría.

A partir de los años sesenta se contó con diferentes herramientas para observaciones en las que se requiere precisamente de esta Teoría de la Relatividad General y muchas de estas cosas pues, simplemente, no eran necesidades que existieran hace cien años. En el caso de los cuásares, por ejemplo, estamos hablando de objetos que fueron descubiertos por los astrónomos en los años sesenta y que precisamente representaban un reto al conocimiento de ese momento, hasta que a alguien se le ocurrió relacionar a estos objetos –que son objetos extremadamente brillantes y distantes de la tierra– con los agujeros negros, entonces ahí siguió la necesidad de utilizar resultados de la Relatividad General para explicar las observaciones que apenas en los años sesenta se estaban obteniendo. En el caso de los cuásares estamos hablando de algo que los astrónomos habían observado sin saber de qué se trataba, eran simplemente

objetos muy brillantes, muy distantes; en el caso de los agujeros negros la situación es un tanto diferente, porque no es algo que los astrónomos hubieran observado primero e identificaran como un agujero negro para buscar después una explicación; más bien, utilizando diferentes fenómenos, se dieron cuenta que el concepto de agujero negro podría servir para ciertas explicaciones; fue un resultado de las matemáticas y de la física nuclear; es decir, tan pronto como se establecieron las ecuaciones de la Relatividad General hace cien años, hubo otro investigador de apellido Schwarzschild que encontró una solución de las ecuaciones de Einstein en donde precisamente las matemáticas dan como resultado la posibilidad de los agujeros negros, pero en ese momento los conocimientos de la astrofísica, de la física nuclear, no eran lo suficientemente finos como para pensar en la posibilidad de que eso que las matemáticas mostraban existiera realmente en el universo. Pasaron muchos años para que se buscaran en el cielo, a través de la astronomía, esas manifestaciones en forma concreta. Digo que es curioso porque las bases teóricas existían desde 1940, pero hubieron de pasar veinte años para que se dieran cuenta de que muchos fenómenos podían ser explicados con la idea del agujero negro.

¿Cien años después, cuál es la condición de la Teoría de la Relatividad General?

En la situación actual hay dos puntos que preocuparían en relación con la Teoría de la Relatividad General, uno es que la TRG establece, “predice” la existencia de ondas gravitacionales, y desde los años cincuenta, precisamente en ese auge que hubo, algunos físicos comenzaron a tratar de detectar esas ondas gravitacionales; la idea, *grosso modo*, es que si hay una explosión estelar o un choque de galaxias o entre estrellas, eso produciría ondas gravitacionales que de alguna manera podrían ser observadas a la distancia que nos encontramos de esos fenómenos; debe de ser algo sumamente difícil de observar y prácticamente desde aquellos años algunos físicos han estado interesados en desarrollar métodos para observar esas ondas. Entonces, en los últimos años se ha estado haciendo un esfuerzo muy



Albert y Elsa Einstein en Japón, Noviembre-Diciembre 1922.

grande, utilizando la luz de un láser para tratar de medir vibraciones mucho menores que el tamaño de un núcleo atómico, estamos hablando de una millonésima de una millonésima de centímetro, o sea que son cosas pequeñísimas que se quieren medir, y tal parece que la única vía que tenemos en la actualidad es utilizar láseres para medir estas pequeñas ondulaciones.

¿Con qué se mide, con el colisionador de hadrones?

No, es un aparato diferente al colisionador de hadrones, consiste básicamente en tubos muy largos de varios kilómetros de longitud, rectos —a diferencia del LHC que es circular—, donde se hacen vacíos casi perfectos; en los extremos del tubo se ponen espejos para que la luz pueda ir y venir sin problema, sin interferencia de aire y cosas así, con la intención de que si llega una onda gravitacional a la Tierra eso produzca algo así como encogimientos y estiramientos del espacio; pero como dije, de tamaño menor de una millonésima de millonésima

de centímetro, que se pudieran notar gracias a la interferencia de la luz en esos tubos. Hasta ahora no han tenido éxito este tipo de experimentos. Hay dos de estos aparatos en Estados Unidos, en el estado de Washington, otro en Luisiana, pero hay más en otras partes del mundo, en Francia, Alemania, Japón, Australia, donde se persigue más o menos la misma idea con la misma técnica. Como los resultados no han sido positivos existe el proyecto en desarrollo de hacer algo similar en el espacio, que en lugar de utilizar tubos de varios kilómetros de longitud en la superficie terrestre, use espejos en órbita utilizando distancias de millones de kilómetros; entonces ya hay un avance considerable en varios lugares del mundo, en Inglaterra en particular, donde se están fabricando partes de este instrumento que consistiría de varios satélites con separaciones mucho más grandes que las de la Tierra, con la esperanza de dar evidencias de que esas ondas gravitacionales efectivamente existen. Ese es quizá el único punto en donde tenemos una predicción de la teoría que no ha sido confirmada directamente en las observaciones. Aunque hay ciertas observaciones astronómicas que indirectamente se

pueden explicar pensando que hay ondas gravitacionales, pero lo que se busca es una evidencia directa que a la larga pudiera convertirse en algún nuevo elemento para estudiar el universo, algo parecido a lo que ocurre en la medicina con los rayos X, la tomografía, el ultrasonido, son diferentes técnicas que se utilizan para ver el interior del cuerpo humano, así mismo a los astrónomos les gustaría tener no solamente radiotelescopios o telescopios ópticos, sino un nuevo tipo de telescopio en que se utilizaran las ondas gravitacionales, pues eso sería algo así como un elemento extra de diagnóstico para estudiar el universo.

¿Hay algún pendiente en la TRG?

La Relatividad General tiene en su haber este problema, digamos, entre comillas, pendiente, el hecho de que hay una predicción concreta que no se ha verificado experimentalmente, eso es un tanto preocupante e interesante también, porque si llegara el momento en que los físicos se convencieran de que tal efecto no existe, entonces eso iniciaría nuevamente una búsqueda parecida a la que Einstein inició hace cien años. Tendríamos que buscar una teoría en la que no hubiera ondas gravitacionales, pero todo lo demás sí se pudiera explicar. El otro punto tiene que ver con la física cuántica. Es decir, la teoría de la gravitación de Einstein es una teoría que emplea solamente conceptos clásicos, entendiendo clásicos como no cuánticos. Y aunque no tenemos ninguna evidencia experimental, existe la creencia de que, en el fondo, la naturaleza es algo cuántico. Entonces ese solo hecho es lo que ha llevado a que muchísima gente en las últimas décadas busque una nueva teoría de la gravitación que incorpore a la física cuántica. Es más o menos parecido a lo que motivó a Einstein hace 110 años; o sea, él simplemente estaba consciente de que la teoría de la gravitación de Newton no tomaba en cuenta la unidad espacio-tiempo y eso le llevó a suponer que tenía que desarrollarse una teoría diferente; ahora estamos en esa misma situación, tenemos una teoría, que es la de la Relatividad General, y como defecto se le puede señalar que no tomó en cuenta a la física cuántica. Entonces, aunque no tengamos ninguna evidencia experimental que nos diga que la gravitación tiene alguna relación con la física cuántica, creemos que así debe

de ser. Eso ha motivado que desde hace mucho tiempo, desde los años cuarenta o algo así, la gente haya estado buscando la manera de, como se dice, cuantizar la relatividad; es decir, proponer una teoría cuántica en que se explique o se trate el campo gravitacional, y hasta ahora no ha habido un éxito convincente. Hay gente que está desarrollando ciertas ideas, que quizá esté convencida que es el camino correcto, pero por lo menos la comunidad en general no está a ese nivel. En esa búsqueda se han desarrollado ideas como las supercuerdas y otras teorías que están de moda precisamente con ese tipo de propósito, el de establecer una teoría más fundamental sobre la materia, pues aunque se puede decir que hoy se entiende ya bastante bien cuáles son las interacciones de las partículas elementales, como no está incluida la gravitación, se ve como un defecto. Entonces hay esperanzas de que algunas nuevas teorías que se han venido desarrollando pudieran lograr lo que se llama Teoría de la Unificación. Y eso es parte del trabajo actual, lo que la gente está buscando, una especie de repetición de lo que ocurrió hace cien años. Lo que guía a muchos es esta idea de que todos los fenómenos en el fondo tienen que ser procesos cuánticos, aunque no tengamos ninguna evidencia experimental, hay ahí una especie de principio o más bien de fe... o algo así. Pero sin que tengamos una base más firme. Y aquí la única base firme es la experimentación, lo que pone a prueba a cualquier teoría física es el experimento. Si no tenemos experimentos que digan “la gravedad requiere de la física cuántica”, la búsqueda es un tanto a ciegas. En el caso de Einstein había una sola observación que lo guió. Aquí yo diría que no tenemos ninguna, eso hace más difícil la búsqueda. Una diferencia es que Einstein estaba prácticamente solo en su búsqueda, mientras que en el caso de estas nuevas teorías estamos hablando de cientos de físicos investigando durante décadas.

Muchas gracias.

Leopoldo Noyola
Antropólogo
Revista Elementos
[**polo.noyola@gmail.com**](mailto:polo.noyola@gmail.com)



© Emilio Salceda, 2008.