

Centenario de la Teoría de la Relatividad General

Mariano A. Nicotra ¹

¹*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 08/02/2016

Fecha de publicación: 15/03/2016

Resumen—Los días entre Junio y Diciembre de 1915 deben ser evocados como uno de los períodos de mayor fertilidad en la historia de la Física. En efecto, comienza con la importante visita de Albert Einstein a la Universidad de Göttingen por iniciativa de David Hilbert. Hilbert y Klein estuvieron presentes en las conferencias de Einstein en las que expuso la versión vigente de la Relatividad General, aun inconclusa y, según el punto de vista de Einstein, terminó convenciendo a ambos matemáticos. Durante los meses posteriores, al menos hasta el 25 de Noviembre, Einstein trabajó intensamente en Zurich corrigiendo sus argumentos, bajo la influencia de Hilbert. En efecto, ambos eminentes hombres intercambiaron numerosas cartas y debieron inducirse mutuamente a mejorar sus argumentos. Al final, utilizando puntos de vista independientes dentro de ese peculiar marco de intenso intercambio epistolar, ambos arribaron a dos versiones ligeramente diferentes de las Ecuaciones de Campo de la Relatividad General, enviadas a publicación en distintos medios con menos de una semana de diferencia. Utilizando una versión previa, Einstein dará explicación a un problema no resuelto por la mecánica newtoniana: el corrimiento del perihelio de la órbita de Mercurio en torno al Sol. En otro artículo posterior, Einstein incluso mejoró su propia predicción sobre la desviación de rayos luminosos debido a campos gravitatorios, cuestión que permitirá algunos años después verificar la validez de sus argumentos. Recurriendo a la oportunidad que brinda el hecho de cumplirse el primer centenario de tales publicaciones, se presenta aquí un breve resumen sobre algunas de las líneas argumentales principales propuestas por estos personajes pioneros en las nuevas teorías de la gravitación.

Palabras clave—gravitación, relatividad general, ecuaciones de campo.

Abstract—The days between June and December 1915th, must be remembered as one of the most prolific period in the history of Physics. In fact, that period started with the visit of Albert Einstein to Göttingen University under the initiative of David Hilbert. During a week, Einstein performed several lectures on the version of General Relativity of those days. Hilbert and Klein attended those lectures and, under Einstein's point of view, both mathematicians finished convinced by Einstein's proposals. During the following months, at least up to 25th November, Einstein worked strongly, polishing his own argumentations under the influence of Hilbert. In fact, both eminent men exchanged several letters and may had mutually induced to improve their theories. Using independent points of views but within the frame of that peculiar high epistolary interaction, both arrived to two slightly different versions for the Field Equations of General Relativity, delivered to publication in different journals with a difference of less than a week. Applying a previous version of those equations, Einstein could give account for an important problem of gravitation in the solar system: the direct advance of the Mercury's perihelia orbit around the Sun, a problem unresolved by the newtonian mechanics. In a later paper, few days after, Einstein also improve his own prediction about the deviation of light rays path due to gravitational fields, a question which later will provide the first important verification of Einstein arguments. Using the opportunity provided the first centennial of those publications; a brief summary is presented in this article considering some of the main arguments built by those important pioneers of new theories of gravitation.

Keywords— gravitation, general relativity, field equations.

INTRODUCCIÓN

A caba de cumplirse un siglo de producido un acontecimiento central en la historia de la Física. Precisamente el 25 de noviembre de 1915, mientras Europa se desangraba en un sangriento conflicto bélico entre sus naciones más poderosas, un profesor de Zurich, *Albert*

Einstein, procuraba mediante ejercicio crítico poner en orden algunos conceptos físicos elaborados durante el formidable avance científico del *siglo XIX*. Luego de una fructífera visita a la *Universidad de Göttingen* para dictar una serie de conferencias y durante la cual entrará en contacto con los eminentes profesores *David Hilbert* y *Félix Klein*, por entonces dos de los matemáticos más importantes del planeta, Einstein finalizará sus investigaciones teóricas destinadas a incorporar la gravitación a sus teorías relativistas sobre el espacio y el tiempo. Los trabajos pioneros de *Einstein* que componen la *Teoría de Relatividad Restringida* habían conseguido resolver importantes interrogantes sobre la propagación de los campos electromagnéticos (por ende, también de la luz)

Dirección de contacto:

Ing. Mariano A. Nicotra. Cátedra de Mecánica Analítica, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la UNC. Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria de Córdoba, X5016 CGA. m.a.nicotra@unc.edu.ar

desde el punto de vista de la interrelación entre diferentes observadores inerciales. Pero faltaba incluir en dicho enfoque a las fuerzas gravitatorias, integrantes esenciales de la mecánica newtoniana. Esta última, aunque constituyó un desarrollo altamente exitoso, había dejado algunas cuestiones sin responder, como el caso del *corrimiento del perihelio de la órbita de Mercurio en torno al Sol*, que mostraba detalles esquivos para la mecánica vigente a comienzos de los 1900s.

Por sugerencia de su excompañero de estudios *Grossman*, matemático, *Einstein* había adoptado el *Cálculo Tensorial* desarrollado en *Pádova* por *Ricci-Curbastro* y *Levi-Civita*, como la herramienta matemática adecuada para sus enfoques teóricos [1]. El objetivo perseguido por *Einstein* de integrar la gravitación a sus principios teóricos requería necesariamente de recursos matemáticos de alta sofisticación. En 1915 una de las *mecas* del conocimiento matemático estaba localizada en el centro de la geografía germana, en la medioeval ciudad de *Göttingen*. Allí desarrollaba sus actividades académicas el matemático *David Hilbert*.

Einstein mismo reconocerá que tuvo la extraordinaria fortuna de encontrar en *Hilbert* a un espíritu gemelo. En efecto, este último va a entender perfectamente lo que *Einstein* está persiguiendo en casi absoluta soledad. Todo indica que sin intenciones de competencia desleal, *Hilbert* decide inmiscuirse en los trabajos de *Einstein* sin pedir demasiado permiso, lo que acarrearía algunas disputas entre ambos más tarde, aunque sólo de carácter transitorio. El análisis de los hechos históricos es claro en señalar que no era la primacía lo que en *Göttingen* importaba y sino el desinteresado afán por colaborar en la búsqueda de la verdad encarada por investigadores de otras universidades. En aquella época en que nadie podía aventurar si los trabajos teóricos de *Einstein* navegaban hacia buenos rumbos, *Hilbert* va a comprender de inmediato lo fértil e interesante de sus propuestas [2].

Finalizada la visita, *Einstein* trabajará cinco arduos meses hasta tener una primera versión de la *Teoría de la Relatividad General* (TRG en adelante) lista para salir a la luz editorial. Se dará mientras tanto un intenso intercambio epistolar con *Hilbert* quien, por su parte, buscaría caminos alternativos tras el mismo objetivo. De manera independiente, ambos arribarán casi simultáneamente al mismo destino con la escasa diferencia de unos pocos días: las hoy denominadas *ecuaciones de campo de la Relatividad General*, llamadas también *ecuaciones de campo de Einstein o ecuaciones de campo de Einstein-Hilbert* [2][3].

Cumpléndose el primer centenario de ambas publicaciones (ver [2][4][5]), se pretende conmemorar dicho evento con un repaso breve de los puntos centrales de los desarrollos de estos dos titanes de la Física. Se hará referencia breve al mérito de la exquisita formulación matemática de *Hilbert* por métodos variacionales y al logro de *Einstein* para explicar el comportamiento de la órbita de Mercurio, éxito primero indiscutible de su propia formulación. Y a la predicción einsteniana de la desviación de las ondas luminosas en campos gravitatorios, abriendo paso al resultado más relevante: la gravitación se incorporaba a la nueva Física.

Cuando en 1919 la misión observacional liderada por *Arthur Eddington* confirmaría durante un eclipse solar en la isla Sobral (Brasil) y en la isla Príncipe (frente a Guinea Ecuatorial) que los pronósticos de la teoría de *Einstein* eran correctos, la tarea estaría prácticamente concluida. Como consecuencia, la mecánica newtoniana habrá sido destronada definitivamente como herramienta autorizada para el entendimiento del Cosmos y relegada a una mera aproximación en bajas velocidades de una nueva teoría, a todas luces superior a la hora de describir los efectos de la gravitación.

1916.

№ 7.

ANNALEN DER PHYSIK.
VIERTE FOLGE. BAND 49.

1. Die Grundlage
der allgemeinen Relativitätstheorie;
von A. Einstein.

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbar weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersteren „spezielle Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel lagen fertig bereit in dem „absoluten Differentialkalkül“, welcher auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Christoffel über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und

Fig. 1. Primera página del artículo de Einstein sobre Relatividad General, recibido el 20 de Marzo de 2016 por los *Annalen der Physik*.

LAS ECUACIONES DE CAMPO

Einstein había sido convencido por *Grossman* sobre la necesidad de apelar a los entes matemáticos matriciales conocidos como *tensores* a la hora de escribir de forma consistente a las leyes de la Física [1][2]. Si bien el concepto físico sobre cómo debían relacionarse entre sí las leyes físicas según dos observadores inerciales en movimiento relativo era propio de *Einstein*, le faltaba un método matemático para abordar los problemas de modo coherente con sus postulados. En las épocas previas a la revolución copernicana, una de las ideas cardinales sobre la naturaleza del Cosmos era la concerniente a la posición privilegiada, central e inmóvil de la Tierra (*hipótesis geocéntrica*), la cual va a ser dominante durante casi dos milenios a lo largo del período comprendido entre la *Enciclopedia de Aristóteles* y el advenimiento del *Renacimiento*. Los datos observacionales acumulados sobre la cinemática del sistema solar, aun cuando se llevaron a cabo con precarios métodos sin ayuda de telescopios, pusieron en serias dudas a este postulado de centralidad especialmente a partir de la publicación del tratado de *Copérnico*. A partir del triunfo de la *Teoría Copernicana*, se fue gradualmente acentuando la preferencia de sostener que lo correcto es lo diametralmente opuesto: nada ocupa una posición central en el Universo y nada está en reposo. Y ningún punto de observación es más importante que otro al

momento de describir las leyes que gobiernan los fenómenos naturales.

La controversia no se agotaba en discutir si era la *Tierra* o el *Sol* el que ocupaba el centro del *Universo*, sino que abarcaba lógicamente su consecuencia cinemática. Lo que estaba en el centro debía estar inmóvil. Y si la *Tierra* era la que estaba en movimiento, se buscaban pruebas de ello mediante experimentos mecánicos llevados a cabo, claro está, en laboratorios terrestres. Las búsquedas fueron fútiles y se llegó a la conclusión que la mecánica newtoniana gozaba de la propiedad de *invarianza galileana*. Ello significa que si se compara el mismo experimento mecánico supuesto que se ha hecho en un laboratorio inmóvil con el mismo experimento realizado en un laboratorio en estado de traslación uniforme, los resultados no acusarían diferencias. Si bien las posiciones y velocidades de un móvil cambian cuando se las mide desde dos sistemas de referencia diferentes tal que uno de ellos se mueve con traslación uniforme respecto al otro, las aceleraciones son las mismas. En esto consiste lo que se conoce como *invarianza galileana*. Las leyes de la dinámica newtoniana, en consecuencia, no permiten discriminar por un experimento mecánico si el laboratorio donde el experimento se lleva a cabo está montado en un sistema inmóvil en el centro del Universo (o fijo en cualquier otra parte) o si se traslada respecto al mismo.

Con el advenimiento del *electromagnetismo maxwelliano* a mediados del siglo XIX, renació la esperanza de determinar el estado de movimiento de traslación de la *Tierra*, aunque ahora mediante un experimento de óptica ondulatoria. El fracaso, producido en las postrimerías del siglo XIX, fue similar a debido a la mecánica, llegándose a la conclusión que ningún experimento físico era capaz de poner de manifiesto si la *Tierra* se trasladaba o si estaba fija en el centro del Universo.

La conclusión aventurada de todos estos antecedentes, desde el punto de vista de *Einstein*, es que *todos los observadores y sistemas de referencia deben ser equivalentes*, incluso si se encuentran en movimiento relativo, a la hora de determinar las leyes físicas. Y que ningún experimento físico es capaz de poner de manifiesto un eventual movimiento terrestre con respecto a un hipotético sistema estático en el espacio. Las leyes físicas, entonces, están obligadas a tener un formato tal que respete tal equivalencia. A esto se lo llama el "*principio de covarianza general*" y exige la aplicación de herramientas matemáticas acordes cuando se formulan las leyes físicas, para que éstas no cambien si se comparan las descripciones de los fenómenos físicos que hacen dos observadores cuyos que se mueven uno respecto al otro. Allí es donde se hace presente el *cálculo tensorial* que, sugerido por *Grossman*, pasa a formar parte del núcleo central de la propuesta einsteiniana [3][4].

Einstein supuso también que la aceleración traslacional de un sistema de referencia respecto a otro no acelerado no debería afectar la equivalencia. Al respecto, resultó crucial su respuesta a uno de los mayores enigmas de la gravitación formulado por el mismo *Newton*: la *equivalencia entre la masa inercial y la masa gravitatoria*. La primera surge

como intermediaria entre las acciones mecánicas (fuerzas) y la aceleración que éstas son capaces de producir en un móvil. La segunda, en cambio, se presenta como un coeficiente de proporcionalidad entre el peso y la aceleración del móvil inmerso en un campo gravitatorio. Si su formulación conceptual es tan diversa, ¿Por qué, tal como los muestran todos los experimentos, habrían de coincidir siempre? Sencillamente, según *Einstein*, porque los sistemas de referencia acelerados (o no-inerciales) son indistinguibles de sistemas sometidos a efectos de campos gravitatorios a la hora de realizar experimentos dinámicos. Por esta razón, un observador dentro de un sistema de referencia en caída libre en un campo gravitatorio verá que el efecto de la gravedad queda compensado por la aceleración que implica la caída libre, de modo que sus experimentos locales le indican que está dentro de un sistema inercial, es decir, libre de aceleraciones. A esto se lo denominará el "*principio de equivalencia*" y está presente en anteriores trabajos de *Einstein* formulados en 1912 [4][5].

Por otra parte, la cantidad de éxitos acumulados por la mecánica newtoniana (fundamentación mecánica del sistema solar, pronóstico de la reaparición del cometa *Halley*, descubrimiento de *Neptuno*, etc.) no permitían sugerir que se estaba en presencia de una formulación incorrecta, sino que simplemente debería tratarse de una propuesta que debía ser perfeccionada por otra teoría superior en sus alcances.

Con estas premisas, tras arduos y prolongados trabajos (1905-1915), con frecuentes marchas y contramarchas en virtud de la complejidad de los cálculos necesarios, *Einstein* llegó a la conclusión que el movimiento de los cuerpos en campos gravitatorios debe ajustarse a expresiones tensoriales de la forma:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

Las mismas, conocidas como las *ecuaciones de campo de la TRG*, constituyen un sistema de 16 ecuaciones diferenciales a derivadas parciales. En efecto, dado que los subíndices μ, ν varían entre 0 y 3, $R_{\mu\nu}$ está integrado por 16 términos. Cuatro de ellos se disponen en la diagonal principal de una matriz cuadrada de 4x4. Por simetría o equivalencia entre las distintas direcciones espaciales, los doce términos restantes se reducen a seis diferentes, por lo cual se tienen 4 + 6 = 10 términos diferentes en general. Y como las diferentes direcciones son equivalentes entre sí para el movimiento relativo entre sistemas de referencia, las 10 ecuaciones se reducen finalmente a sólo 6 ecuaciones independientes. Que μ, ν adopten los valores 0,1,2,3 es indicativo que los fenómenos físicos tienen lugar en un *espacio-tiempo de tres dimensiones espaciales y una cuarta temporal*, cuestión ya resuelta en la teoría previa de la *Relatividad Restringida*, en la cual los fenómenos gravitatorios están fuera de consideración.

$R_{\mu\nu}$ es un tensor que contiene derivadas parciales espacio-temporales de $g_{\mu\nu}$. Este último, a su vez, es un

tensor 4x4 cuyos componentes dependen de cómo se distribuyen las masas gravitatorias en el sistema físico bajo análisis. Se lo conoce, a $g_{\mu\nu}$, como el *tensor de Riemann* y de acuerdo a la propuesta einsteniana, sus componentes se deben relacionar con los potenciales gravitatorios. En cuanto a R , se trata de una cantidad escalar conocida como *escalar de Ricci*.

En el segundo miembro, $T_{\mu\nu}$ es el “*tensor de energía - impulso*”, que contiene a las componentes de la cantidad de movimiento y la energía del sistema dinámico sometido a los efectos gravitatorios.

Que se deba apelar al recurso de complejas ecuaciones diferenciales a derivadas parciales no es exclusivo de la gravitación relativista. Quien recuerde sus etapas de formación básica en electromagnetismo o en mecánica de fluidos tendrá presente los casos de los potenciales eléctricos, de los potenciales de velocidades o de la función corriente en fluidos, que se relacionan también con soluciones de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales (ecuaciones de *Laplace* y de *Poisson*). Algo equivalente prevé el enfoque clásico de la gravitación newtoniana, por lo cual no debería sorprender que la *TRG* apele a formalismos de similar complejidad.

El enfoque novedoso que propuso *Einstein* tuvo que ver, además, con el significado de los términos del primer miembro en las ecuaciones de campo. Su formulación implica que las masas gravitatorias tienen un *efecto geométrico en el espacio y el tiempo físico*, determinando que ambos se combinen en un *espacio-tiempo* con estructura de *espacio de Riemann* en reemplazo del *espacio euclideo* convencional de la mecánica newtoniana. En este último, el tiempo actúa como un parámetro independiente y tanto el espacio como el tiempo que no son afectados por la presencia de materia. En la *TRG*, en cambio, la presencia de materia condiciona totalmente la estructura geométrica del espacio-tiempo. La concepción de la influencia geométrica de las masas gravitatorias es una de las innovaciones fundamentales de *Einstein*. Entre las consecuencias principales está aquella que los rayos luminosos se deben apartar de las trayectorias rectas en las proximidades de las masas gravitatorias relevantes, debido a la *deformación o curvatura* que las masas imponen al *espacio-tiempo*, obligando a la luz a seguir trayectorias curvas en reemplazo de las líneas rectas que propone la óptica geométrica clásica para el vacío. En efecto, el *espacio de Riemann* se caracteriza por ser *curvo*. Las masas gravitatorias “*curvan*” el espacio de una manera particular y las ondas luminosas o las partículas en movimiento sujetas a la gravitación deben seguir trayectorias curvas denominadas “*geodésicas*”. El razonamiento einsteniano facilita una nueva interpretación de la naturaleza de los campos gravitatorios: son perturbaciones físicas que se manifiestan por la *curvatura del espacio-tiempo tetradimensional*. El espacio físico pierde la concepción original newtoniana de un mero recipiente vacío que contiene a cuerpos y campos electromagnéticos sin ser afectado por ellos. Es ahora un ente físico en sí mismo que es condicionado por la materia y a la vez condiciona las trayectorias de los cuerpos en movimiento y a las ondas electromagnéticas que se propagan en el mismo.

Tal como se explica en cualquier curso básico sobre *TGR*, (por ejemplo, [6]) “*La mejor ilustración de la diferencia entre estas dos maneras de pensar es la interpretación de la ecuación de movimiento de una partícula en un campo gravitatorio. Donde para Newton la partícula obedece su segunda ley*

$$\ddot{x}^i - F_{grav}^i / m = 0 \quad ; \quad i = 1,2,3 \quad (2)$$

para *Einstein*, la partícula sigue una geodésica en el espacio tiempo curvo,

$$\ddot{x}^\mu - \Gamma_{\nu\rho}^\mu \dot{x}^\nu \dot{x}^\rho = 0 \quad ; \quad \mu, \nu, \rho = 0,1,2,3 \quad (3)$$

En otras palabras, lo que para Newton es la fuerza gravitatoria a distancia (F_{grav}/m), es para *Einstein* un término puramente geométrico:

$$\Gamma_{\nu\rho}^\mu \dot{x}^\nu \dot{x}^\rho = 0 \quad (4)$$

debido a la *curvatura no-trivial del espacio-tiempo*”. Se debe aclarar que los coeficientes que multiplican a las derivadas de x_μ y x_ν , se conocen como *símbolos de Christoffel de segunda clase* y están definidos por las derivadas parciales del tensor $g_{\mu\nu}$ y por la *curvatura del espacio-tiempo*.

En cuanto a la vinculación de las ecuaciones de campo con las ecuaciones de la mecánica clásica, baste decir que estas últimas se muestran como el caso límite de campos gravitatorios débiles, por la cual la nueva teoría no contradice ni anula, sino que complementa con nitidez a la mecánica clásica.

EL APORTE DE HILBERT

Aunque no estaba dotado de la intuición de *Einstein* para los problemas propios de la Física, *Hilbert* dominaba como pocos las Matemáticas de principios del *siglo XX*, lo cual le permitía entender perfectamente los planteos del primero. Por ello se dispuso a abordarlos y aunque comenzó en forma relativamente tardía, obtuvo casi simultáneamente soluciones similares a las de *Einstein*, aunque mediante un camino de mayor rigor analítico, aplicando métodos que a diferencia de los planteos de *Einstein*, están plenamente vigentes hoy día en la formulación actual de la *TRG*. Los trabajos de *Hilbert* al respecto se publicaron en su forma definitiva en marzo de 1916 en el órgano oficial de la *Sociedad Científica de Göttingen* [7]. Sus ecuaciones de campo fueron derivadas por métodos variacionales a partir del concepto de curvatura del espacio-tiempo. Precisamente, son los métodos variacionales los que resultan más apropiados si se pretende describir movimientos a lo largo de líneas geodésicas en un espacio

curvo. Una dificultosa reconstrucción histórica sobre los trabajos de *Hilbert* y sobre las cartas intercambiadas con *Einstein*, especialmente una de ellas del 16 de Noviembre de 1915 y sobre algunos documentos inexplicablemente dañados por estudiosos faltos de escrúpulos, permiten determinar que la propuesta de Hilbert se basó en tres pasos:

1) Formulación de la *función lagrangeana* H del sistema dinámico, presentado originalmente como adición entre el *lagrangeano* K del campo gravitatorio y el *lagrangeano* L debido a la materia y radiación:

$$H = K + L \quad (5)$$

2) Aplicación del *principio variacional de Hamilton de mínima acción*, que también es utilizado en la mecánica clásica a la hora de determinar las ecuaciones diferenciales de movimiento de las partículas:

$$\delta \int (K + L) \sqrt{g} dw = 0 \quad (6)$$

3) Derivación, mediante cálculo diferencial, de las ecuaciones de campo:

$$\sqrt{g} \left(K_{\mu\nu} - \frac{1}{2} K g_{\mu\nu} \right) + \frac{\partial L \sqrt{g}}{\partial g^{\mu\nu}} = 0 \quad (7)$$

$K_{\mu\nu}$ es el *tensor de Ricci* y K el *escalar de curvatura*. $\sqrt{g} dw$ es el volumen invariante del espacio-tiempo y w las coordenadas en dicho espacio-tiempo (que hoy suelen expresarse como x^α). El correspondiente *tensor de energía-impulso, propio de la propuesta einsteniana*, se puede obtener a partir de:

$$T_{\mu\nu} = 1 / \sqrt{g} \partial L \sqrt{g} / \partial g^{\mu\nu} \quad (8)$$

tal como es aceptado actualmente en las formulaciones vigentes de la *TRG*, por lo cual las expresiones de *Hilbert* para las ecuaciones de campo son totalmente equivalentes a las de *Einstein*, aunque se las deriva de un tratamiento de mayor generalidad y elegancia [3].

LA TRG Y LA MECÁNICA NEWTONIANA

A la luz de la *TRG*, la mecánica newtoniana deja de ser una verdad universal. Se limita a una mera aproximación de la dinámica para los casos de campos gravitatorios débiles y para móviles con velocidades mucho menores la luz en el vacío. Cuando los campos gravitatorios son importantes, como sucede en la cercanía de las estrellas, es inevitable abordar los problemas aplicando la *TRG*. Los supuestos objetos superdensos que se encontrarían en los núcleos galácticos o las estrellas simbióticas en estadios avanzados de evolución, deben ser analizados según las ecuaciones de campo de Einstein. Y si el Universo se considera en calidad

de un objeto único sometido a las fuerzas gravitatorias entre sus partes, tal cual lo enfoca la *Cosmología*, no existe hoy otro camino riguroso que aquél indicado por la *TRG*.

El movimiento de objetos en campos gravitatorios débiles, como acontece con los satélites artificiales alrededor de la Tierra, puede ser abordado por cortos períodos de tiempo mediante la mecánica clásica. Algo similar acontece con los experimentos ordinarios laboratorios terrestres que involucran velocidades alejadas de la velocidad de la luz en el vacío. En estos últimos casos, la mecánica newtoniana resulta suficiente.

CURVATURA DE LOS RAYOS LUMINOSOS EN CAMPOS GRAVITATORIOS:

En sus primeros intentos de incorporar los efectos gravitatorios a su teoría de *Relatividad Restringida*, Einstein había concluido en 1911 que los campos gravitatorios debían tener influencia en la propagación de las ondas luminosas y había formulado el *principio de equivalencia*. Tales razonamientos le permitieron arribar a una predicción sorprendente: *la posibilidad de desviación de rayos luminosos por campos gravitatorios intensos*. Las ecuaciones de campo en 1915 iban a fundamentar definitivamente sus predicciones al respecto. Las trayectorias de las ondas luminosas, analizadas localmente en un campo gravitatorio, siguen siendo las líneas rectas que señalan la óptica geométrica clásica. Pero es el espacio físico el que se comporta de manera distinta. Es el espacio mismo el que experimenta el fenómeno de curvatura por efecto de la gravitación, por lo cual las trayectorias rectas se deben reemplazar por *líneas geodésicas* en un *espacio de Riemann*. En el ámbito del sistema solar, ese hecho sólo puede ser observable para haces luminosos que, proviniendo de las estrellas, pasen muy cerca de la superficie solar. Cuestión que debía dirimirse en ocasión de un eclipse solar total, cuando la *Luna* oculta por completo al disco solar y facilita la visión de las estrellas en la zona de la esfera celeste ocupada por los dos cuerpos involucrados en el eclipse.

Luego del fracaso de una *misión cordobesa* liderada en 1912 por *Charles Dillon Perrin*, director del *Observatorio Nacional de Córdoba* (llovió todo el día en la localidad de *Cristina* en el *Brasil* a donde se habían montado los equipos para observar el eclipse) y de un segundo fracaso, esta vez por una misión observacional alemana en *Crimea*, la que debió abortarse en 1914 por el estallido de la primera guerra mundial, en 1919 *Eddington* y *Crommelin* confirmaron la predicción einsteniana en la famosa observación del eclipse solar en la *isla Príncipe* y en la *isla Sobral (Brasil)*. Los pronósticos de *Einstein* al respecto demostraron ser los correctos. La tarea estaba prácticamente concluida, con veredicto final favorable de la nueva *TRG*. Fue un resultado que conmovió al mundo científico y catapultó a sus autores a las cimas de la consideración de expertos y legos.

LAS CONSECUENCIAS COSMOLÓGICAS

Una de las mayores consecuencias de las ecuaciones de campo es que abrió el camino para el descubrimiento de la expansión general del universo. En efecto, alentado por sus primeros resultados positivos, *Einstein* intentaría después aplicar sus ecuaciones de campo tratando de obtener una solución cosmológica, válida para el *Universo* en su conjunto. Entre sus intentos infructuosos de resolver sus ecuaciones para este caso, llegó a proponer la existencia de un término adicional, proporcional al *tensor* $g_{\mu\nu}$ multiplicado por una constante Λ que pasó a llamarse la *constante cosmológica*. Es equivalente a sostener, entre otras posibles interpretaciones, la existencia de una repulsión que contrarresta la atracción gravitatoria en escalas muy grandes del Universo. *Einstein* lo considerará más tarde como un error vergonzoso y abandonaría este mundo convencido de ello. Más adelante sin embargo, después de su fallecimiento, se lo contabilizará entre sus más audaces y acertadas propuestas. Precisamente, los cosmólogos discuten hoy fuertemente sobre el valor de dicha constante y las evidencias favorecen su existencia.

En la década de 1920 destacados matemáticos o físicos como *Friedmann*, *Lemaitre*, *Robertson* y *Walker*, resolvieron las ecuaciones de campo cosmológicas con mejor suerte. Sus resultados condujeron a una predicción que parecía absurda para esos tiempos: el *Universo* estaría en estado de permanente expansión o contracción generalizada. El físico y sacerdote católico belga *George Lemaitre*, uno de los autores independientes de tal solución, va a dar los primeros pasos de la *Teoría del Big-Bang*, proponiendo que el Universo nació de a partir de un evento explosivo (el *huevo cósmico*) a partir del cual se ha expandido incesantemente segundo a segundo. La hipótesis de la *expansión general del Universo* tuvo como primer soporte observacional el *corrimiento al rojo* (*redshift*) descubierto en USA por *Edwin Hubble* y será confirmada en 1965 con el descubrimiento del *fondo de radiación cósmica*. Otro éxito indiscutible de la *TRG*.

CONCLUSIONES

Es posible que haya quienes se pregunten qué rédito hay en recordar el centenario de la obra de dos hombres que se aventuraron a asomarse en las intrincadas “sendas tensoriales” de la Física. ¿Por qué debe ser vista la formulación de la *TRG* como un logro destacado del pensamiento humano? ¿Tiene sentido inmiscuirse en los complejos cálculos del espacio-tiempo curvos? ¿Qué importancia merece saber que la luz de las estrellas se desvía unos mínimos segundos de arco al pasar rasantes a la superficie solar? ¿En qué afecta la vida cotidiana del común de los mortales, como sí en cambio lo han conseguido otras ramas de la Física, tal el caso de la *Termodinámica* o del *Electromagnetismo*? (el último caso, por ejemplo, alumbró el nacimiento de la *Era de las Telecomunicaciones* en la cual estamos inmersos).

Tales interrogantes no son sino renovados ecos de la pregunta que, según *Montaigne*, *Anaxímenes* remitió en supuesta misiva a *Pitágoras* cuando alrededor del 500 AC se cernía sobre la *Antigua Grecia* la inminente amenaza del

imponente cerco militar persa: “¿Con qué propósito habría de preocuparme en investigar los secretos de las estrellas, teniendo continuamente delante de mis ojos a la muerte y la escalitud?”. Es posible que la pregunta encierre en sí misma el germen de respuesta. Porque, en forma individual o colectiva, los seres humanos experimentamos los avatares y contratiempos propios de la existencia, peregrinando frecuentemente de un tropiezo en otro, es que puede cobrar significado el preguntarse sobre el *Universo* y sus leyes. Quizás porque constituye “... una las pocas cosas que eleva la vida humana por encima del nivel de la farsa y le imprime algo de la elevación de la tragedia” [11]. Y quienes pretendan esgrimir la escéptica posición de descreer en las capacidades de la mente humana para decodificar los misterios de la Naturaleza, quizás acepten admitir que se está ante una obra de deslumbrante refinamiento artístico con la cual, como sostiene el *Martin Fierro*, se va en busca de cierta especie de consuelo [12]. Ello, sin embargo, estaría lejos de ser un desmérito, ya que como acontece con toda producción artística genial, las obras agigantan sobradamente la talla intelectual de sus autores.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Javier Martín, profesor a cargo del Laboratorio de Enseñanza de la Física de la FCEfyN, quien sugirió oportunamente la conveniencia de dar este texto a publicidad.

Al editor de la Revista de la FCEfyN, por su paciencia y tolerancia.

REFERENCIAS

- [1] M. M. G. Ricci y T. Levi-Civita, *Méthodes de calcul différentiel absolu et leurs applications*, en *Mathematische Annalen*, Volume 54, Issue 1.
- [2] L. Corry, *Einstein, Hilbert y la Teoría General de la Relatividad*, Universidad de Tel Aviv, (disponible en <http://www.tau.ac.il/~corry/publications/articles/pdf/invciencia.pdf>).
- [3] D.W. Ebner, (2006) How Hilbert has found the Einstein Equations before Einstein and forgeries of Hilbert's page proofs, Physics Department, University of Konstanz.
- [4] A. Einstein, (1916) *Fundamentos de la Teoría General de la Relatividad*, *Annalen der Physik*.
- [5] A. Einstein, (1915)(XLIV) Zur allgemeinen Relativitätstheorie. Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte.
- [6] S. Weinberg, (1972) *Gravitation and cosmology. principles and applications of GR*, Ed. Wiley.
- [7] J. Renn & J. Stachel, (2007) Hilbert's Foundation of Physics: From a Theory of Everything to a Constituent of General Relativity. Max Planck Institute for the History of Science.
- [8] W. Rindler (1979), *Essential Relativity*, Ed. Springer-Verlag.
- [9] P.G. Bergmann, (1942) *Introduction to the Theory of Relativity*, Ed. Prentice-Hall.
- [10] B. Jansen, (2013) *Introducción a la Relatividad General*, Universidad de Granada. (disponible en www.ugr.es/~bjansen/text/BertJansen-RelatividadGeneral.pdf)
- [11] S. Wienberg, (1980) Los tres primeros minutos, Alianza Editorial.
- [12] J. Hernández. *Martin Fierro*, “Que el hombre que lo desvela // Una pena extraordinaria, // Como la ave solitaria // Con el cantar se consuela.” (disponible en www.me.gov.ar/efeme/tradicion/versos.html).