

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

SELECCIÓN DE TRABAJOS DE LAS XIV JORNADAS

VOLUMEN 10 (2004), Nº10

Pío García

Patricia Morey

Editores



ÁREA LOGICO-EPISTEMOLÓGICA DE LA ESCUELA DE FILOSOFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE LA FACULTAD DE FILOSOFÍA Y HUMANIDADES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons atribución NoComercial-SinDerivadas 2.5 Argentina



Relatividad General: de la abstracción a la tecnología

Pedro Walter Lamberti* / Víctor Rodríguez†

Introducción

La teoría de la relatividad general de Einstein, de 1916, es una de las grandes producciones científicas del siglo XX y probablemente uno de los símbolos más representativos del nivel de abstracción y profundidad del conocimiento científico. Esta influencia simbólica ha trascendido las fronteras de la física y ha impregnado varios sectores de la cultura general. En este sentido, se ha asociado su estructura y alcance a niveles de sofisticación sólo alcanzados por pocas obras producidas por el intelecto humano.

La historia de esta influencia puede descomponerse en diversas facetas, asociadas cada una de ellas con diferentes disciplinas, siendo naturalmente la física el área de investigación que más ha acusado su influencia. Pero también ha contribuido al desarrollo de varias ramas de la matemática contemporánea, en virtud de la potencia expresiva de las ecuaciones de campo de Einstein. Esta influencia puede verse en la investigación que se ha venido realizando durante la primera mitad del siglo XX en geometría diferencial y numerosas sub-ramas directamente relacionadas con la evolución de la geometría. Desde hace varias décadas la investigación en métodos globales ha dado frutos excelentes, los que se han incorporado en el modo de presentar la disciplina. Puede tomarse a título de ejemplo el libro de S. Hawking y G. Ellis, *The large scale structure of space-time* [1], que ha sido durante largos años un fiel representante del nuevo estilo de abordaje de esta teoría. Es una interesante línea de investigación abierta en historia de la ciencia el análisis de las interacciones entre la relatividad general y áreas de la matemática contemporánea, y aún cuando ya existe considerable tratamiento del tema, no parece un campo suficientemente aclarado desde una perspectiva histórico-epistemológica. En los capítulos que han sido ya estudiados con suficiente detalle, la relación entre física y matemática en torno de esta teoría ha sufrido variaciones de intensidad y comunicación, como así también ha sucedido con el modo de abordar las cuestiones epistemológicas asociadas con las relaciones entre estos campos disciplinares. Por ejemplo, en las primeras décadas del siglo XX permanecían resabios de una concepción armónica entre ellas que en muchos casos justificaron heurísticas y grandes programas de investigación sobre la base de una especie de armonía pre-establecida. Esencialmente en el sentido en que se desarrolló este enfoque a partir de algunos pensadores de la filosofía moderna, como es el caso de Leibniz. El historiador Lewis Pyenson, por ejemplo, ha reflejado algo de esta interacción entre matemática y física en su libro sobre el joven Einstein [2]. Es necesario decir que este programa epistemológico todavía subsiste y es usado en muchos casos para justificar la búsqueda de estructuras matemáticas en domi-

* Universidad Nacional de Córdoba. CONICET.

† Universidad Nacional de Córdoba.

nios de las ciencias empíricas. Aún cuando se ha metamorfoseado en función de los cambios que se produjeron en la estructura teórica de la relatividad general, todavía goza de cierta presencia en el ámbito de los teóricos.

Esta ha sido la línea de investigación más robusta en la historia de esta teoría. Ha marcado la forma y el estilo de trabajo de varios grupos importantes de investigación, y a través de esta actividad ha generado una imagen del lugar de la misma en el concierto de las teorías científicas contemporáneas. En esencia, la imagen que ha cobrado dominio público es que la teoría de la relatividad general es una obra intelectual exquisita, de escaso a nulo valor práctico a escala terrestre, pero de inmensa presencia a escala cósmica, debido a que es recién en esa escala donde pueden apreciarse los efectos sutiles del campo gravitatorio, inaccesibles en principio desde un punto de vista práctico en el entorno de nuestro planeta.

En realidad, a esta imagen también contribuyó de modo decisivo el magro avance de técnicas observacionales y experimentales para testear la teoría. Con excepción de los llamados "experimentos clásicos", esto es, la desviación de los rayos de luz en presencia de campos gravitatorios, el corrimiento gravitacional hacia el rojo de la luz, y el avance del perihelio de mercurio, fue realmente difícil diseñar experimentos contundentes para captar los límites de aplicabilidad de la misma. Más aún, durante varias décadas, los especialistas no lograron coincidir en la evaluación del *status* de estos experimentos, en particular, debido a que la precisión de las mediciones obtenible en cada uno de ellos dejaba margen para incertidumbre en las interpretaciones de los resultados. En la segunda mitad del siglo XX los resultados comenzaron a afianzarse y la teoría se consolidó lentamente, especialmente en el entorno del sistema solar. Obras como la de Clifford Will [3], muestran la lenta evolución de las técnicas experimentales asociadas con las teorías de la gravitación y nos permiten apreciar el incremento en precisión de las mediciones y la sofisticación creciente de los diseños experimentales. En algunos casos esto ha sucedido a expensas de la proximidad de los objetos en consideración y el campo de prueba se desplazó hacia la astrofísica. Así, con las observaciones del comportamiento de un pulsar binario, la astrofísica permitió hacer avanzar el chequeo de la teoría hasta niveles comparables a los mejores resultados obtenidos en la física. Esto llevó al físico Roger Penrose a afirmar hace pocos años que la relatividad general era la más precisa de las teorías científicas en cuanto a acuerdo entre teoría y observación. En la cultura general de los físicos de las últimas décadas, este rol se solía asignar a la electrodinámica cuántica, debido a las notables concordancias entre las predicciones teóricas y las observaciones realizadas, como en el caso del momento magnético del electrón. Sea cual fuere el caso, para nuestros fines sólo es importante destacar que a pesar del irreversible avance en la precisión de las observaciones, el *status* experimental de la teoría durante varias décadas no permitió avizorar aplicaciones tecnológicas significativas a corto plazo en escala terrestre. El mejor ejemplo ilustrativo sobre este punto que hemos encontrado es el siguiente comentario de Synge, un conocido relativista que contribuyó con sus trabajos a la formación de numerosos especialistas destacados. En su libro sobre la teoría general de la relatividad de finales de la década de 1960 [4], en el prefacio dice:

De todos los físicos, el especialista en relatividad general es el que menor compromiso social tiene. Él es el gran especialista en teoría de la gravitación, y la gravedad es socialmente significativa, pero no es consultado en la construcción de una torre, un puente, un barco o un aeroplano, y aún los astronautas pueden funcionar sin él...

Nuestro objetivo aquí es mostrar de un modo esquemático un ejemplo reciente de aplicación de la teoría que tiene, por contraste con lo expuesto, notables consecuencias tecnológicas y que está invadiendo el mercado como producto tecnológico de variadísimas aplicaciones. Lamentablemente, muchas de estas aplicaciones tecnológicas han estado dirigidas hacia fines bélicos, y en este sentido no escapa esta faceta de la relación entre ciencia y técnica al destino de numerosas realizaciones científicas que encuentran aplicaciones en campos insospechados y a veces no deseados. Pero de cualquier modo, su alcance trasciende este desagradable ámbito y puede observárselo en contextos de gran utilidad social. Se trata del sistema de posicionamiento global, GPS, que es usado actualmente por varias decenas de millones de personas en el mundo, por motivos de navegación, exploración, etc.

En lo que sigue se dará una descripción del GPS a los efectos de ilustrar cómo se hace necesario, para garantizar el funcionamiento del sistema, el tener en cuenta las correcciones proporcionadas por la relatividad general.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global es un sistema de navegación sobre y en vecindades de la superficie de la Tierra, basado en emisiones de ondas de radio. Su funcionamiento es una clara realización de la concepción relativista del espacio-tiempo, como así también un banco de prueba para los principales fenómenos previstos por la Relatividad General. Más aún, el propio diseño del sistema requiere para su funcionamiento que se tengan en cuenta varios efectos relativistas.

El GPS consta de tres segmentos:

- 1) *El Segmento Espacial*: constituido por 24 satélites en órbita alrededor de la Tierra a unos 20000 km de altitud ubicados en distintos planos;
- 2) *El Segmento de Control*: Estaciones de Control y Monitoreo administradas por el Departamento de Defensa de los EEUU y *El Segmento del Usuario*: constituido por los receptores de GPS de uso civil o militar

Otro ingrediente básico e indispensable, y que permitió en los hechos la puesta en funcionamiento del sistema, es la disponibilidad de relojes (atómicos) extremadamente estables y precisos. Una idea de este requerimiento lo da el hecho que para evitar errores de navegación mayores a 1m, cada uno de los relojes montados sobre los satélites no deben desincronizarse con los otros (es decir, entre ellos) en más de 4 ns ($1\text{ns} = 10^{-9}$ seg). A su vez, los relojes en los satélites deben concordar con los relojes de referencia en Tierra con una precisión de 20ns.

Es relevante en este punto recordar que uno de los postulados fundamentales de la Relatividad dice que "la velocidad de la luz es independiente del movimiento de sus fuentes". Desde un punto de vista formal, en este principio está fundamentado la idea general de como localizar un punto en la cercanía de la Tierra por medio

del GPS. En efecto, consideremos cuatro relojes atómicos perfectamente sincronizados, los cuales transmiten pulsos electromagnéticos desde las posiciones r_j a los tiempos t_j , $j = 1, 2, 3, 4$. Supongamos que esas señales se reciben en el punto r (en la cercanía de la Tierra) al tiempo t . Por el principio arriba mencionado, vale

$$c^2(t - t_j)^2 = |r - r_j|^2, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

donde $c=299792458$ m/s es la velocidad de la luz. Estas cuatro ecuaciones pueden ser resueltas para las tres coordenadas espaciales de r y para el tiempo t . Las ecuaciones (1) son válidas si todas las cantidades involucradas (salvo c) son referidas a un mismo sistema de referencia (inercial). Es decir, se debe especificar respecto a cual sistema de referencia se han sincronizado los relojes. A modo de dato complementario, basta mencionar que los receptores GPS están ubicados sobre la superficie terrestre (o en su entorno) y que la misma realiza una rotación con una velocidad angular $\omega_E = 7.292115 \times 10^{-5}$ rad/s. Esto obliga a realizar una sincronización en la que se tenga en cuenta este movimiento no inercial.

Existen varias consideraciones sobre los sistemas de referencia respecto a los cuales deben sincronizarse los relojes montados en los satélites. Analizar esto nos conduciría a enfrentar diversas cuestiones técnicas, las cuales, el lector interesado puede consultar en la referencia [5]. Preferimos aquí indicar los algunos de los efectos relativistas que deben tenerse en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento del sistema.

Efecto Doppler Gravitatorio: Una consecuencia directa de la Relatividad General es el desplazamiento en frecuencia de una señal electromagnética debido a la diferencia de potencial gravitatorio entre el emisor y el receptor. Este desplazamiento está cuantificado a través de la expresión

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta \Phi}{c^2}$$

donde $\Delta \nu$ es la diferencia entre la frecuencia de la señal recibida y la frecuencia de la señal emitida (ν) y $\Delta \Phi$ es la diferencia de potencial gravitatorio entre el satélite y la superficie terrestre. Es importante mencionar que este efecto fue experimentalmente verificado en la década del 60 en un magnífico experimento realizado por Pound and Rebka [6]. Este desplazamiento causa que los relojes en los satélites del sistema avancen más rápido (corrimiento hacia el azul) que idénticos relojes sobre la superficie terrestre en una proporción de 5×10^{-10} .

Efecto Doppler por movimiento: La velocidad de cada uno de los satélites del sistema es de aproximadamente 4 km/s

La dilatación temporal conduce también a un efecto de desplazamiento de frecuencia en la radiación emitida por una fuente en movimiento. Este desplazamiento se manifiesta en un corrimiento hacia el rojo (los relojes montados en los satélites avanzan más lentamente que idénticos relojes en reposo respecto a la superficie terrestre). Dependiendo de la altura y velocidad de los satélites este efecto y el anterior pueden conducir a un desplazamiento neto hacia el rojo o hacia el

azul. Por ejemplo para una órbita baja como la de los transbordadores espaciales, la velocidad es tan grande que predomina la dilatación temporal, mientras que para un satélite del GPS el corrimiento gravitacional hacia el azul, predomina. Los efectos se cancelan para un radio de la órbita cercano a los 9545 kilómetros.

Otros efectos deben ser tenidos en cuenta, como por ejemplo la corrección debida a la excentricidad de la órbita de los satélites. Esta debe ser hecha por el receptor y es una corrección de la coordenada temporal transmitida por el satélite. Para un satélite en una órbita con una de excentricidad $\varepsilon = 0.01$, el máximo valor de esta corrección es de 23 ns. También debe considerarse el efecto Sagnac, el cual está asociado, en este caso, al hecho que la tierra gira sobre su propio eje. Estas correcciones finalmente afectan al procedimiento de sincronización de los relojes usados por el sistema. El lector interesado puede encontrar detalles acerca de cómo cuantificar estos efectos en la referencia [5].

Conclusión

El objetivo del presente trabajo ha sido ilustrar básicamente el modo en que se hace presente la relatividad general en el dominio tecnológico del GPS. Para finalizar nos permitimos realizar algunos breves comentarios generales. Por un lado, estimamos que este ejemplo arroja luz sobre la evolución del alcance de la teoría de la relatividad general en términos prácticos y experimentales, pero por otro, también creemos que el mismo permite evaluar de un modo complementario al que se ha venido realizando mayormente hasta la fecha, el *status* epistemológico de la misma. En particular, la interacción entre la teoría y los experimentos, y especialmente, la interacción entre la teoría y el diseño de instrumentos para realizar experimentos. Esto ha sido analizado de diversas formas para el caso de la relatividad especial de Einstein de 1905, en particular, por su incidencia en el diseño y mejora de instrumentos, como los aceleradores de partículas para la física atómica y nuclear. Es natural suponer que el nivel de aceptación de una teoría es mucho mayor cuando algunas de sus confirmaciones han sido usadas para el diseño de nuevos instrumentos, los que a su vez han dado origen a otros descubrimientos importantes. En nuestra opinión, un nivel de aplicación tecnológica, como el observado en el caso del GPS, es mucho más elocuente en este sentido, ya que refleja un inesperado campo de aplicaciones que son producto de un cruce de áreas científico-tecnológicas de última generación (relojes atómicos, procesamiento digital de señales, tecnología satelital, etc.). El sistema GPS luce así como una instanciación confirmatoria realmente contundente de una teoría que muchas veces fue criticada, precisamente por su escasa inserción práctica. Más aún, el GPS no sólo necesita de la relatividad general para funcionar con alta precisión, sino que es una representación efectiva de la concepción espacio-temporal asociada con esta teoría.

A nuestro criterio, la instanciación de este sistema tecnológico representa, para los cánones usuales de confirmación de teorías, un notable posicionamiento de la Relatividad General en relación con su tradicional *status* en lo referido a la relación existente entre teoría y experimentación. Naturalmente, esto no excluye *a priori* la posibilidad que otro marco teórico diferente a ella pueda dar cuenta de

los mismos fenómenos Pero hasta el momento, hasta donde conocemos el tema, este no es el caso.

Bibliografía

1. Hawking S., Ellis G.: *The large-scale structure of space-time*, Cambridge University Press, Cambridge, 1973.
2. Pyenson L.: *El joven Einstein. El advenimiento de la relatividad*, Alianza Universidad, Madrid (1990).
3. Will C.: *Theory and experiment in gravitational physics*, Cambridge University Press, Revised Edition, Cambridge (1993).
4. Synge J L.: *Relativity: The general theory*, North Holland Publishing Company, Amsterdam.
5. Ashby N.: "Relativistic Effects in the Global Positioning System". *Gravitation and Relativity: at the turn of the millennium. Proceeding of the XV General Relativity and Gravitation Congress* (1998). Eds.: N. Dadhich y J Narlikar, IUCAA, Pune, India. Una excelente descripción de la relación entre relatividad y el GPS, por parte de este autor, puede consultarse en <http://www.livingreviews.org>
6. Pound R. y Rebka G.: *Phys. Rev. Lett.* 4, 337 (1960).