

Einstein, Hilbert y la Teoría General de la Relatividad

Leo Corry - Universidad de Tel Aviv

El 20 de Noviembre de 1915, David Hilbert presentó una más de sus muchas ponencias ante la Real Sociedad de Ciencias de la Gotinga. Hilbert (1862-1943) había sido el indiscutido líder de este gran centro científico, y tal vez de todo el mundo matemático, por lo menos desde principios de siglo, de manera que a primera vista, un acontecimiento de este tipo no podría calificarse sino de rutinario. Sin embargo, el tema discutido en esta oportunidad, así como las circunstancias que rodearon dicha discusión y sus consecuencias, conciernen a uno de los episodios más remarcables en la historia de la ciencia durante la primera mitad de este siglo: la formulación casi simultánea—al menos en apariencia—a manos de Hilbert y de Albert Einstein, de las ecuaciones de campo de covariancia general, que constituyen el corazón de la teoría general de la relatividad (TGR).

Durante ese mismo mes de Noviembre, Einstein (1879-1955) presentó cuatro ponencias sobre gravitación y relatividad en la sucesivas sesiones semanales de la Academia Prusiana en Berlín. Sólo en la última de ellas, el 25 de Noviembre (es decir, cinco días después de la ponencia de Hilbert), presentó Einstein lo que vendría a conocerse como la versión definitiva de sus ecuaciones. Ese mes de Noviembre fue para Einstein la culminación de uno de los períodos de más intensa y dramática actividad en su vida científica; un período iniciado en 1912 y durante el cual sostuvo una difícil y prolongada lucha en el tortuoso camino hacia la TGR. La formulación de las ecuaciones de covariancia general (es decir, ecuaciones cuya forma se mantiene invariante bajo cualquier tipo de transformación de coordenadas) se llegaron a convertir en el paso decisivo para la exitosa coronación de sus esfuerzos.

Algunos meses antes de el episodio que nos ocupará aquí, en el verano de 1915, Einstein había venido a Gotinga, invitado por Hilbert, para exponer el estado actual de sus investigaciones. La personalidad de Hilbert lo impresionó tremendamente, y la comunicación entre los dos iba a mantenerse viva en el período crítico que precedió a la publicación de las ecuaciones. De hecho, durante los meses de Octubre y Noviembre, contrario a su costumbre de mantener una correspondencia constante con gran cantidad de correspondientes simultaneos, la correspondencia de Einstein se concentró en una sola persona: David Hilbert. Hilbert y Einstein intercambiaron ideas

intensivamente, a veces diariamente, y este intercambiaron fue fundamental para el progreso de ambos hacia la formulación de las ecuaciones.

La ponencia de Hilbert en Gotinga, cuyo título fue "Los Fundamentos de la Física" (*Die Grundlagen der Physik*), tuvo lugar dos días después de que Einstein presentara su tercera comunicación a la Academia de Berlín. Esta comunicación fue especialmente importante, ya que las ecuaciones formuladas en ella ofrecían una explicación satisfactoria, como no se conocía hasta aquel entonces, del intrigante fenómeno de las anomalías detectadas en el movimiento perihélico del planeta mercurio. Con toda razón, Einstein consideraba que (a pesar de que las ecuaciones que aquí aparecían fueron posteriormente modificadas), la habilidad de resolver este viejo enigma astronómico representaba un éxito incontestable de su teoría. Hilbert compartió totalmente esta opinión, y de hecho, inmediatamente al recibir por correo el borrador de esta comunicación, le hizo llegar a Einstein sus más calurosas felicitaciones por el logro. Sin embargo, los dos científicos siguieron buscando formular ecuaciones de campo más adecuadas, las cuales presentaron la siguiente semana, primero Hilbert y después Einstein.

Las ecuaciones de Hilbert se publicaron en Marzo de 1916 en el órgano oficial de la Sociedad Científica de Gotinga, bajo la siguiente formulación:

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

Aquí, $K_{\mu\nu}$ representa el así llamado tensor de Ricci, K es la curvatura de Riemann, y L es una función que depende de los potenciales electromagnéticos q_s , y de sus derivadas q_{sk} , así como de los potenciales gravitatorios $g_{\mu\nu}$ (pero no de sus derivadas). Aunque Hilbert no realizó este paso en detalle en la versión publicada de su comunicación, es posible demostrar que sus ecuaciones de campo son en realidad equivalentes a las que Einstein presentó en su cuarta comunicación:

$$K_{\mu\nu} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right).$$

Aquí κ es una constante, y $T_{\mu\nu}$ es el tensor de la energía de tensión, y T es su traza.

He aquí, entonces, lo que parece ser un asombroso caso de descubrimiento simultáneo, involucrando dos de los más prominentes científicos alemanes de su época, y uno de los más importantes logros científicos del siglo veinte. Este intrigante episodio ha atraído continuamente la atención de físicos e historiadores de la ciencia, y ha sido objeto de repetidas investigaciones. El presente artículo describe en líneas gen-

erales el trasfondo sobre el cual él se desarrolló, prestando particular atención a un curioso documento que mi propia búsqueda en los archivos relevantes ha sacado a la luz recientemente. Este documento permite reinterpretar, basado ahora en clara evidencia, muchas de las preguntas concernientes a la disputa de prioridad que se despertó naturalmente dada la simultaneidad de los trabajos de Hilbert y Einstein.

La tortuosa vía de Einstein hacia la relatividad general

En 1912 dejó Einstein la Universidad Alemana de Praga para retornar a Zürich, donde años atrás había realizado sus estudios y donde también obtuvo su primer puesto académico en 1909. Practicamente desde su retorno a Zürich, Einstein inició una activa colaboración con su viejo amigo, el matemático Marcel Grossmann (1878-1936), en el intento de desarrollar una teoría relativística de la gravitación. Esta teoría conllevaba la ampliación del grupo de transformaciones bajo las cuales las teorías físicas deberían ser invariantes, a un grupo menos restringido que el que Einstein había adoptado como base de la teoría especial de la relatividad formulada en 1905 (es decir, las “transformaciones de Lorentz”). Fue Grossmann quien indicó a Einstein que el lenguaje matemático adecuado para llevar a cabo esta generalización podría tomarse de la teoría de los espacios riemannianos, así como del cálculo tensorial desarrollado hacia fines del siglo anterior por Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925).

Retrospectivamente, el requerimiento de covariancia general es el que ha venido a quedar asociado más resaltantemente con la TGR. Sin embargo, en su búsqueda tras la formulación correcta de la teoría, Einstein fue guiado por varios principios y requerimientos básicos, y la relativa importancia que Einstein confería a cada uno de ellos pasó por una serie de transformaciones a lo largo de los años. En las fases iniciales de su búsqueda, el requerimiento de covariancia general fue derivativo del intento de Einstein de imponer otro principio físico que en su concepción jugaba un rol mucho más fundamental: el principio de equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria. La validez de este principio para todos los fenómenos de la física—mecánica, electrodinámica, etc.—implica que la distinción entre marcos de referencia acelerados o no acelerados no puede mantenerse. Dado que esta distinción es en realidad posible tanto en la teoría newtoniana como en la teoría especial de la relatividad, Einstein concluyó que si tomamos el principio de equivalencia como la clave para una teoría relativística de la gravitación, entonces dicha teoría deberá generalizar el principio (especial) de relatividad que él mismo había formulado en 1905 para marcos de referencia inerciales (es decir, no acelerados). Una tal generalización, entonces, deberá ser

válida para al menos algún tipo de marcos acelerados, de manera que lo que queda por establecer es el rango preciso del tipo de transformaciones de coordenadas a las cual debería extenderse la relatividad. La adopción del lenguaje tensorial fue la que ayudó a Einstein a aclarar esta pregunta, aunque la vía para hacerlo resultó ser aún larga y penosa.

En 1913 Einstein y Grossmann publicaron el “Esbozo de una Teoría Generalizada de la Relatividad y de una Teoría de la Gravitación”, un trabajo conjunto en el cual se representaba el campo gravitatorio por medio de el tensor métrico, que simultáneamente representaba la estructura del espacio-tiempo. A diferencia de todas las teorías físicas conocidas hasta entonces, la estructura del espacio-tiempo aparecía aquí por primera vez, no ya como un ente dado a-priori, sino como sujeta a ecuaciones dinámicas que la hacen depender del campo gravitatorio mismo y de sus fuentes. Este cambio radical de concepción fue otro de los pasos fundamentales que debían tomarse en la vía hacia la TGR.

Al intentar generalizar el dominio de validez del principio de relatividad, lo ideal sería, obviamente, no imponer a-priori ningún tipo de limitaciones e intentar formular ecuaciones de covariancia *general*. Por otro lado, como la teoría newtoniana había demostrado con creces su efectividad descriptiva de los procesos gravitatorios, parecería razonable buscar ecuaciones de campo que generalizaran la de esta teoría, es decir la ecuación de Poisson:

$$\Delta\phi = 4\pi\kappa\rho,$$

donde Δ representa el operador laplaciano, κ es una constante y ρ es la densidad de masa. Una generalización tensorial de la teoría newtoniana sugeriría, entonces, que el lado izquierdo de la ecuación (es decir, el término gravitacional) debe involucrar derivadas segundas de la métrica, lo cual vendría siendo una generalización relativística del potencial gravitatorio newtoniano, mientras que en el lado derecho (la fuente) debe aparecer el tensor de energía de tensión, que sería la generalización relativística de la masa newtoniana. El aporte de Grossmann consistió en indicar a Einstein que el tensor de curvatura de Riemann es el único tensor que puede formarse a partir del tensor métrico, y de sus derivadas primeras y segundas, y además, que la contracción de ese tensor, es decir, el tensor de Ricci, podría ser el único candidato de covariancia general a ocupar el lugar del término gravitacional.

Sin embargo, entre 1912 y 1915 Einstein rechazó este posible candidato para sus ecuaciones de campo, y por ende, también la covariancia general como requerimiento básico de su teoría. De esta manera, en la teoría presentada en el “esbozo” de 1913, así como en todas las que formularía hasta 1915, las ecuaciones no son invari-

antes bajo transformaciones arbitrarias de cualquier tipo, sino tan sólo bajo una clase más restringida (aunque ya más general que la del grupo de Lorentz): la de las transformaciones lineales. Los motivos que llevaron a Einstein a rechazar inicialmente la covariancia general como requerimiento de su teoría han ocupado la atención de físicos e historiadores durante muchos años y sólo la investigación histórica reciente ha aclarado este interesante capítulo de la historia de la ciencia. Los trabajos de historiadores como John Norton, Jürgen Renn, John Stachel, Tilman Sauer y otros, han contribuído enormemente en esta dirección. Ellos han estudiado, clasificado y comentado la enorme cantidad de material manuscrito que nos ha quedado de aquella época, ayudando así a comprender los detalles del proceso de evolución del pensamiento de Einstein en lo tocante a este tema. De particular importancia en este respecto ha sido el análisis detallado del “cuaderno de Zürich”, una laberíntica colección de 96 páginas que incluye breves notas, esquemáticos cálculos y crípticas sugerencias, y que Einstein compiló aleatoriamente, sin ningún tipo de orden lógico e inclusive sin señalar fechas, pero cuyo contenido indica sin duda alguna que lo hizo en la época de su estadía en Zürich, estando totalmente sumergido en el desarrollo de la TGR.

El cuaderno de Zurich, junto con documentos adicionales, tanto publicados como inéditos, han permitido a los historiadores reconstruir los vaivenes que caracterizaron la evolución del pensamiento de Einstein en su vía hacia la TGR. Uno de los puntos más fascinantes de esta tortuosa vía es el papel jugado por el notorio “argumento del hoyo”. Einstein formuló este argumento en 1913, y en base a él sostuvo que no es posible describir el fenómeno gravitatorio por medio de ecuaciones de covariancia general, ya que tales ecuaciones, presumiblemente, determinarían de manera *no única* el campo gravitacional en una región que no contenga materia (un _hoyo_). En efecto, sea dada una distribución de masa tal que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ se anula tan sólo dentro de dicha región, y supongamos tener ecuaciones de campo que sean de covariancia general, y un sistema de soluciones $g_{\mu\nu}$ para un cierto sistema de coordenadas x^m . Einstein elaboró un argumento según el cual la covariancia general le permitiría construir una segunda solución $g_{-\mu\nu}$, idéntica a la primera fuera del hoyo, pero que variara gradual y continuamente desde su frontera hasta llegar a diferir de aquélla dentro de él. Einstein consideraba problemática la existencia de esta segunda solución, ya que ella parecería contradecir el principio de la causalidad al no poderse determinar de manera única los procesos físicos que tienen lugar dentro del hoyo.

Einstein no pudo llegar al final de su difícil búsqueda, hasta tanto no abandonó el argumento del hoyo definitivamente, para poder así aceptar una vez más la posibilidad de ecuaciones de campo de covariancia general. Ésto no sucedió hasta la última semana del crucial mes de noviembre de 1915. El que él haya insistido durante tanto

tiempo en la validez de un argumento que a la larga resultó insostenible no se debió a crasa ignorancia, sino más bien al haber pasado por alto un punto sumamente sutil, tocante al significado físico de las transformaciones de coordenadas. Dicho brevemente, Einstein había asumido implícitamente que los puntos que se encuentran dentro del susodicho hoyo poseen individualidad física aun antes de que el tensor métrico haya sido especificado dentro de él. Bajo este supuesto, el argumento es ciertamente válido. Pero hacia fines de 1915, Einstein llegó a comprender la falacia implicada por su argumento, al entender que las propiedades físicas de los puntos dentro el hoyo dependen, de hecho, de la métrica y por tanto ellos no existen antes de que ésta sea especificada.

Durante su estadía en Zürich, entonces, y posteriormente en Berlín (a donde se trasladó en abril de 1914) hasta pasado el otoño de 1915, Einstein se ocupó de desarrollar y justificar varias versiones de las ecuaciones de campo de gravitación, que *no* satisfacían la covariancia general. Einstein arguyó que sus ecuaciones eran invariantes bajo la más amplia clase posible de transformaciones para las cuales el argumento del hoyo no es aplicable. Todo esto cambió durante los dramáticos meses de Octubre y Noviembre de 1915, siguiendo a su visita a Gotinga y su intensa correspondencia con Hilbert. Pasemos a ver la historia, entonces, desde el otro lado de la moneda, es decir, considerando el desarrollo de los acontecimientos en esta última ciudad, y en particular, el gradual involucramiento de Hilbert en las ideas conectadas con la TGR.

La idiosincrática vía de Hilbert hacia la relatividad general

A partir del inicio del siglo veinte la supremacía matemática de Gotinga era un hecho indiscutido. Felix Klein (1849-1925), el gran arquitecto de esta magnífica institución, había logrado traer a Hilbert desde la lejana Königsberg en 1895. En 1902 Hilbert rehusó aceptar la cátedra que se le ofreciera en Berlín, cambiando así definitivamente el balance de fuerzas entre estos dos centros. Hilbert logró agregar ese mismo año una tercera cátedra matemática especialmente creada para su amigo Hermann Minkowski (1864-1909), y en los años siguiente todavía se les unirían matemáticos aplicados del calibre de Carl Runge (1856-1927) y Ludwig Prandtl (1875-1953), así como el astrónomo Karl Schwarzschild (1873-1916) y el geofísico Emil Wiechert (1861-1928). Entre los jóvenes científicos que trabajaban en la misma universidad en aquel entonces se contaban nombres tan resaltantes como los de Ernst Zermelo, Otto Blumenthal, Max Abraham, Max Born, Ernst Hellinger y otros.

La carrera matemática de Hilbert se inició con importantes contribuciones a la teoría de los invariantes algebraicos y a la teoría algebraica de los números. En 1899 publicó Hilbert su clásica obra “Los Fundamentos de la Geometría”, tema al cual dedicó sus esfuerzos también durante los primeros años del nuevo siglo. Desde 1903 hasta 1912, Hilbert dedicaría sus mayores esfuerzos matemáticos a la teoría de las ecuaciones integrales. Pero junto con esto, a lo largo de toda su carrera en Gotinga Hilbert mantuvo un vivo interés en temas relacionados con la investigación física reciente. Desde 1898 Hilbert dictó cursos y seminarios en los más variados temas en física: mecánica, mecánica de continuos, estructura de la materia, teoría cinética de los gases, teoría de la radiación. A partir de 1912, Hilbert también publicó varios trabajos tocantes a los fundamentos matemáticos de estas disciplinas.

Presentándolo de una manera más amplia, podríamos decir que la física contemporánea ofreció un importante foco de atención para los matemáticos de Gotinga, y que la colaboración entre éstos y los físicos de la misma universidad fue siempre muy activa y productiva. Uno de los productos más conocidos de esta tendencia fueron los trabajos de Minkowski entre 1907 y 1909, relacionados con la fundamentación matemática de la teoría especial de la relatividad, que había sido formulada tan sólo recientemente por Einstein. Como en todos los otros aspectos de sus investigaciones, Hilbert y Minkowski discutieron a fondo las ideas relacionadas con la teoría de la relatividad, mientras éstas iban cuajando en la mente de Minkowski. Luego de la prematura muerte de Minkowski en 1909, Hilbert siguió diseminando sus ideas en los cursos de física que dictó en Gotinga.

Uno de los tópicos físicos que atrajo particularmente la atención de Hilbert a partir de 1911, fue el de la estructura atómica de la materia. En 1912, el físico Gustav Mie (1868-1957), trabajando a la sazón en la universidad de Halle, empezó a desarrollar una teoría basada en la posibilidad de describir el electrón y todas sus propiedades físicas, como una singularidad en el eter electromagnético. Mie no fue el primero en seguir esta dirección, pero fue probablemente el primero en elaborarla de manera más o menos consistente, y con lujo de detalles matemáticos. Esta teoría aceptaba el principio especial de la relatividad entre sus suposiciones básicas (y a la vez, rechazaba la posibilidad de generalizar este principio), y de hecho, ella constituía una generalización de la geometría plana del espacio-tiempo que Minkowski había desarrollado previamente. Max Born (1882-1970), el físico sobre el cual la influencia de Hilbert llegó a sentirse con mayor intensidad, elaboró algunas de las ideas de Mie en el año 1913 y logró entusiasmar a Hilbert con ellas. Durante 1914 y 1915 Hilbert estudió esta teoría y sus consecuencias a fondo, y llegó a adoptarla como base para un posible programa unificado de fundamentación de la física, en el cual pudieran explicarse los diversos

fenómenos naturales como expresiones de una única realidad electromagnética subyacente.

En las reuniones de la sociedad matemática de Gotinga, presididas siempre por Hilbert, se discutieron también los recientes trabajos de Einstein, y en particular el “Esbozo de una Teoría de Gravitación” escrito en conjunto con Grossmann. Incidentalmente, una de las metas declaradas, pero no alcanzadas por Mie al desarrollar su teoría, fue el incorporar los fenómenos gravitatorios dentro de ella. En diferentes ocasiones a lo largo del año 1914, Mie y Einstein se vieron enfrascados en una álgida disputa concerniente a las ventajas y desventajas de sus respectivas teorías como posibles generalizaciones relativistas de la teoría newtoniana de la gravitación.

Así, al ser invitado Einstein a Gotinga en el verano de 1915, el trasfondo estaba bien dispuesto para que Hilbert entrara de lleno a enfrentarse con los problemas de la TGR. Hilbert deseaba elaborar de manera más completa las ideas introducidas por Mie y resolver los problemas que éste había dejado abiertos. Basándose en las sugerencias de su colega Born, Hilbert consideró que las concepciones desarrolladas por Einstein le ofrecerían los medios adecuados para cumplir su meta. Hilbert estaba a la búsqueda de una teoría unificada de campo, una “fundamentación de la física” en general, y una combinación apropiada de las teorías de Mie y de Einstein iban a servirle de base para lograrlo.

Einstein, Hilbert y la relatividad general

Einstein llegó por primera vez a Gotinga en junio de 1915, y presentó una serie de seis conferencias, en las cuales discutía el estado actual de sus investigaciones sobre la TGR. Einstein quedó muy positivamente impresionado de la recepción que le fue otorgada, y por encima de todo, de la actitud de Hilbert. “En Gotinga he tenido el placer de ver que mis ideas fueron totalmente entendidas, hasta los últimos detalles;”—escribió Einstein a Sommerfeld, a su retorno a Berlín—“Especial entusiasmo me ha causado Hilbert. Una personalidad impresionante!”

No disponemos de evidencias directas que indiquen qué versión de su teoría expuso Einstein en Gotinga, pero parece justificado suponer que aún sostenía alguna versión de aquella que había desarrollado en conjunto con Grossmann, y que postulaba la invariancia de las ecuaciones gravitacionales, tan sólo bajo transformaciones lineales. Aparentemente, Klein y Hilbert no elevaron en aquella oportunidad objeciones ante los argumentos limitativos de Einstein, y en particular, ante el argumento del hoyo.

Pero alrededor de Octubre, el entusiasmo de Einstein con sus resultados—un entusiasmo que había aumentado considerablemente con su visita a Gotinga—empezó a deteriorarse. En una carta fechada el 7 de noviembre, Einstein confesó a Hilbert que ya algunas semanas antes había llegado a convencerse que los métodos usados en sus demostraciones eran erróneos. A partir de este momento, Hilbert y Einstein se vieron enfrascados en un amistoso duelo intelectual dirigido a formular las definitivas ecuaciones del campo gravitatorio, acompañado de una correspondencia a veces diaria que les permitió a cada uno de los dos seguir de cerca los avances de su colega.

La tercera de entre las cuatro versiones de Einstein ante la Academia de Berlín, presentada el 18 de noviembre, constituyó un verdadero triunfo científico al poder explicar con gran exactitud, basado en la teoría relativística de la gravitación, las misteriosas anomalías encontradas desde 1859 en el movimiento perihélico del planeta mercurio. Este logro daba una verdadera ventaja a la teoría de Einstein sobre la de Newton, ya que esta última nunca había podido explicar dicho fenómeno. Sin embargo, esta versión de la teoría no abandonaba aún las limitaciones autoimpuestas por Einstein sobre la clase de transformaciones admitidas.

La ponencia de Hilbert ante la Sociedad Científica de Gotinga tuvo lugar dos días después. El contenido de esta ponencia fue publicado en las transacciones de la Sociedad en marzo del año siguiente, incluyendo las ecuaciones de campo de covariancia *general*:

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

Además, Hilbert afirmaba que estas ecuaciones de gravitación “parecían corresponder” a las de Einstein. Naturalmente, al leer la versión publicada de la ponencia de Hilbert, uno piensa en comparar las ecuaciones que allí aparecen con las ecuaciones definitivas de Einstein, es decir, con aquellas presentadas cinco días después ante la Academia de Berlín, las ya mencionadas

$$K_{\mu\nu} = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right).$$

Notemos aquí, que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ introducido por Einstein no tiene una auténtica contrapartida en la teoría de Hilbert, ya que ésta última se basa en la teoría de Mie, en la cual la materia es considerada en términos puramente electrodinámicos. Pero si suponemos, como Hilbert, que este tensor queda totalmente determinado por variaciones en la función lagrangiana L , y si ésta última depende tan sólo de la gravitación, obtenemos entonces que

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial g^{\mu\nu}}.$$

Tomando en cuenta este punto, podemos derivar, a partir de las ecuaciones publicadas en marzo por Hilbert, la ecuación

$$K_{\mu\nu} - \frac{1}{2} K g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu},$$

que resulta ser equivalente a las antes mencionadas ecuaciones definitivas de Einstein.

Vemos pues que tanto Hilbert como Einstein llegaron a formular, eventualmente, ecuaciones del campo gravitatorio que satisfacían el requerimiento de covariancia general, y el curso de los eventos aquí descritos dio lugar a la inevitable pregunta de la prioridad en el descubrimiento. Hilbert mismo, debemos decir de antemano, nunca puso en duda la prioridad de Einstein, y de hecho, al hablar de la teoría general de la relatividad en los años siguientes, siempre atribuyó a Einstein “uno de los mayores logros jamás conseguido por el espíritu humano”. Pero por otro lado, varios de los contemporáneos de Hilbert, tales como Klein, Wolfgang Pauli (1900-1958) y Hermann Weyl (1885-1955), acreditaron a Hilbert la prioridad en la derivación de las ecuaciones de campo. Más aún, las reacciones inmediatas de Einstein durante el mes de diciembre de 1915 sólo corroboran este punto de vista. Así, se conoce una carta de Einstein a uno de sus amigos en Zürich, en la cual le comentaba su indecible alegría al haber logrado finalmente coronar su teoría, pero junto con ello le descubría (refiriéndose claramente a Hilbert aunque sin mencionar su nombre) que “tan sólo un colega ha entendido la teoría perfectamente, y este colega ha tratado de manera muy astuta de ‘nostrificarla’”. Y al mismo Hilbert le escribía el 20 de diciembre lo que sigue:

Ha habido ultimamente entre nosotros un enfriamiento de relaciones cuyas razones no quisiera analizar. Yo he tenido que luchar dentro de mí contra cualquier tipo de resentimiento, y en ésto he alcanzado un éxito total. Otra vez puedo pensar en usted en términos absolutamente amistosos, y le pido que piense usted en mí en los mismo términos. Sería una enorme lástima que dos hombres como nosotros, cuyo trabajo los ha colocado por encima de este vil mundo, no se dieran el uno al otro más que mutuo deleite.

Y así pues, historiadores de la ciencia han elaborado repetidamente la versión, según la cual Hilbert y Einstein llegaron casi simultaneamente a las ecuaciones de campo correctas, y además han atribuido claramente la prioridad a Hilbert en lo concerniente a su correcta formulación. Se ha sugerido inclusive, que fue Einstein mismo quien “nostrificó” los resultados de Hilbert, al identificar en una de las cartas de éste el crucial término de la traza, $-g_{\mu\nu}K$, el cual Einstein agregó tan sólo en su tercera ponencia del 18 de noviembre. Claro que esta posibilidad es de hecho descartada, basándose en la

tremenda dificultad matemática del artículo de Hilbert, el cual debe haber consumido una enorme cantidad de tiempo y esfuerzo de parte de Einstein, antes de que pudiera realmente entender los detalles de su contenido. Pero en todo caso, el juicio ha sido claro: Einstein desarrolló la teoría, y Hilbert logró la prioridad en la formulación correcta de las ecuaciones cruciales.

Un documento inédito y una reinterpretación histórica

Un documento inédito encontrado recientemente como parte de mi búsqueda en los archivos de Hilbert en la universidad de Gotinga proporciona información inequívoca que nos permite reinterpretar el curso de los acontecimientos arriba descritos. Se trata de las galeras de prueba originales del artículo de Hilbert publicado en marzo de 1916. Un sello estampado en la primera página de estas pruebas indica claramente la fecha en que fueron entregadas a él por la prensa: 6 de diciembre de 1915, es decir dos semanas después de la ponencia misma. Tanto el artículo publicado como las galeras anuncian que la ponencia fue presentada el 20 de noviembre de 1915. Sin embargo, entre estos dos documentos existen sustanciales diferencias que dejan ver de manera tajante las correcciones introducidas por Hilbert entre la ponencia y la publicación. En particular, las galeras nos permiten ver de manera *inequívoca* que la disputa de prioridad entre Hilbert y Einstein debe ser desde ahora olvidada: en la ponencia del 20 de noviembre ante la Sociedad Científica de Gotinga, *Hilbert no incluyó ecuaciones de campo gravitatorio de covariancia general!*

En su versión publicada Hilbert hace referencia a la cuarta ponencia de Einstein, del 25 de noviembre, publicada el siguiente 2 de diciembre. Obviamente Hilbert pudo haber introducido los cambios necesarios en su artículo, después de haber leído el de Einstein. Para explicar con exactitud las diferencias entre el contenido original de la ponencia de Hilbert y el de su versión impresa deberíamos discutir todos los detalles del trabajo, lo cual sería prohibitivo en el presente marco. Me limitaré, por tanto, tan sólo a señalar algunos puntos generales que le permitan al lector hacerse una idea de lo sucedido.

En las galeras, Hilbert afirmó expresamente que su teoría *no puede* satisfacer la covariancia general. Y como para que no queden dudas del punto de referencia pertinente, Hilbert explicó la necesidad de agregar a las diez ecuaciones diferenciales—que corresponden en su teoría a los fenómenos gravitatorios y que son de covariancia general—otras cuatro ecuaciones para los procesos electromagnéticos, de covariancia más

limitada, ya que de lo contrario, se estaría violando el principio de causalidad. En otras palabras, a estas alturas Hilbert está todavía aceptando en su totalidad las consecuencias del argumento del hoyo de Einstein.

En la versión publicada en marzo, por el contrario, Hilbert abandonó este argumento, y de hecho, en la segunda parte de su trabajo, publicada en 1917, él dió una nueva definición de la causalidad dentro de una teoría de covariancia general, definición que esencialmente sigue siendo utilizada hasta hoy en día. Más aun, en esa oportunidad Hilbert mencionó el hecho de que en las versiones anteriores de su teoría Einstein postuló ecuaciones de covariancia limitada. La correspondencia entre Hilbert y Einstein indica que ellos abandonaron el argumento del hoyo y sus significativas consecuencias de manera casi simultánea, y que el diálogo entre los dos contribuyó definitivamente a este cambio. Pero las galeras clarifican ahora que Hilbert no lo hizo antes de ver los resultados definitivos de Einstein.

Otra diferencia de interés es la siguiente: en las galeras Hilbert presentó un lagrangiano que incluye el término gravitatorio $\sqrt{g}K$, e indicó que el componente gravitatorio de las ecuaciones aparece como una derivada variacional del término gravitatorio con respecto a la métrica $g^{\mu\nu}$, tal y como debe serlo en la teoría. Sin embargo, él no presentó de manera alguna la forma explícita de este componente gravitacional. Por el contrario, en la versión publicada las ecuaciones aparecen de forma explícita tal y como lo hemos mencionado. Más interesante aún es el hecho, que Hilbert explica que dichas ecuaciones se justifican directamente, y sin ningún cálculo adicional, debido a que el tensor de Ricci que aparece en ellas, $K_{\mu\nu}$, es el único tensor de segundo orden (fuera de $g_{\mu\nu}$) mientras que la traza K , es el único invariante que puede construirse a partir de los $g^{\mu\nu}$ y de sus derivadas primeras y segundas. Pero en realidad, este argumento es matemáticamente *incorrecto*, y de hecho, al republicar estos trabajos en 1924, Hilbert reformuló el argumento, introduciendo en vez de él una explicación general de cómo el término gravitacional podría ser propiamente calculado.

Algunos detalles de menor significado técnico se suman a los anteriores para hacernos comprender el proceso de transformación de las ideas de Hilbert. Un ejemplo interesante aparece ya en el párrafo introductorio del artículo. La versión impresa de marzo 1916, que enfatiza ante todo la importancia de la contribución de Einstein, reza así:

Los impresionantes problemas formulados por Einstein, así como los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos, junto con las concepciones tan originales y de tan largo alcance por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física.

No es ésta, sin embargo, la manera en que Hilbert presentó originalmente los dos componentes de su teoría. En las galeras de diciembre encontramos las siguientes palabras:

Las concepciones tan originales y de tan largo alcance por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, junto con los impresionantes problemas formulados por Einstein, así como los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física.

Al ver la historia de la relatividad desde la perspectiva de los trabajos de Einstein, la versión publicada en marzo es la que parecería hacer más justicia al peso específico de cada uno de los componentes de la teoría de Hilbert. Sin embargo, desde el punto de vista de la evolución del pensamiento de Hilbert mismo, la versión original es sin duda la más fiel a su historia personal: la vía de Hilbert a la teoría de la relatividad lo llevó primero a la teoría de Mie, en donde sus verdaderos intereses encontraron eco, y tan sólo después a la de Einstein. Claro que Hilbert comprendió a la postre la muchísimo mayor profundidad y generalidad de ésta última, y decidió darle el crédito que se merecía. La carta de Einstein a Hilbert citada más arriba, no puede sino haberlo estimulado más aún a introducir un cambio de este tipo (y otros similares) antes de publicar su ponencia.

Otro punto de interés concierne al significado de los problemas *físicos* aquí involucrados y la manera en cada uno de los dos científicos los afrontaba. Ya he mencionado que la complejidad de estos problemas y de su interrelación con los formalismos matemáticos desarrollados para afrontarlos eran un punto de interés crucial para Einstein, y que ellos explican el enorme esfuerzo y el largo tiempo que tomó a éste su completa solución. Hilbert discutió estos problemas de manera superficial a lo sumo, y es probable que no estuviera realmente al tanto del verdadero significado de todos ellos. Así, en una carta del 18 de noviembre, Einstein le escribe:

No tuve ninguna dificultad en encontrar las ecuaciones de covariancia general para los $g^{\mu\nu}$. Eso es fácil con ayuda del tensor de Riemann. Lo que es en verdad difícil es reconocer que esas ecuaciones constituyen una generalización, y más aún, una generalización simple y natural de las leyes de Newton.

Este tema tan importante para Einstein, nunca fue mencionado por Hilbert.

Pero haríamos tal vez una gran injusticia a Hilbert, si dejásemos nuestra exposición en este punto, en lo que podría aparecer un flagrante caso de plagiarismo científico de parte de él. Nada tan lejos de la realidad, si entendemos el contexto histórico adecuado. Ya hemos mencionado el peculiar estilo de investigación que caracterizó la escuela de Gotinga en el tiempo de Hilbert y Klein; un estilo, y un ambiente

de trabajo, en el cual la más intensa y sostenida interacción entre los profesores, docentes y alumnos, constituía el eje central de toda la actividad. En este ambiente, el trabajo investigativo de cualquiera de los participantes implicaba el uso constante de ideas, técnicas y problemas, sugerido por primera vez por algún colega, bien local o bien de otra institución, y que pasaba directamente a formar parte del patrimonio común. En muchos casos, la comunidad local aprendía sobre nuevas ideas que habían surgido en algún otro lugar, y las reformulaban y desarrollaban de acuerdo con los estándares y necesidades locales. En tales condiciones resultaba a veces realmente difícil establecer una clara atribución de deudas intelectuales. De aquí el término “nostificar” que Einstein menciona en su carta, y que atribuía a Max Abraham. Abraham había sido docente en Gotinga a principios de su carrera y conocía muy bien el término y su significado. De manera alguna debería tomarse el término como una indicación necesaria de plagiarismo, y mucho menos con perfidia.

Es muy probable que nunca lleguemos a saber con certeza y en detalle las motivaciones y las circunstancias que llevaron a Hilbert a introducir cada uno de los cambios que operó en su ponencia original, hasta su publicación en marzo de 1916. Podemos asumir que hubo en ello dosis variadas de malicia, ambición natural, ingenuidad, y reconocimiento auténtico. Lo cierto es que desde un comienzo no había ninguna posibilidad de que Hilbert pudiera haber afrontado la prioridad de Einstein en cuanto al desarrollo de la teoría. Tampoco había necesidad alguna, ya que a la sazón la fama de Hilbert estaba firmemente establecida en todo el mundo científico. Y en todo caso, como ya fue mencionado, desde el momento de la publicación y en adelante, Hilbert todavía tendría muchísimos años de actividad; en todas sus conferencias, cursos y publicaciones, nunca cesó de mencionar la teoría general de la relatividad como la creación personal de Einstein, ni dudó tampoco en calificarla como “la más importante creación del espíritu humano desde siempre”.

Bibliografía Complementaria

BELATED DECISION IN THE HILBERT-EINSTEIN PRIORITY DISPUTE. L. Corry, J. Renn, y J. Stachel en *Science*, vol. 278, pp. 1270-1273 (14 noviembre 1997).

HERMANN MINKOWSKI AND THE POSTULATE OF RELATIVITY. L. Corry en *Archive for History of Exact Science*, vol. 51 (4), pp. 273-314 (1997).

HOW EINSTEIN FOUND HIS FIELD EQUATIONS. J. Norton en *Einstein and the History of General Relativity*, editado por D. Howard y J. Stachel, pp. 101-159, Boston, Birkhäuser (1989).

EINSTEINS ZÜRICHER NOTIZBUCH. J. Renn y T. Sauer en *Pyshikalische Blätter*, vol. 52, pp. 865-872 (1996).

Leo Corry

enseña historia de la ciencia en la Universidad de Tel-Aviv. Ha publicado investigaciones sobre la historia del álgebra moderna, el desarrollo del enfoque estructural en matemáticas, y sobre el trabajo de David Hilbert durante sus años en Gotinga. Ha residido como investigador invitado en el Instituto Max-Planck de Berlín y en el Instituto Dibner de Historia de la Ciencia del MIT.