

Víctor Rodríguez - Marisa Velasco - Pío García
Compiladores

Filosofía de las ciencias y prácticas científicas

Rodríguez, Víctor

Filosofía de las ciencias y prácticas científicas / Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García; compilado por Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García; editado por Víctor Rodríguez; Marisa Velasco; Pío García. - 1a ed.-Córdoba: Editorial de la UNC, 2015.

170p.; 21 x 15 cm.

ISBN 978-987-707-014-9

1. Epistemología. 2. Actividad Científica. I. García, Pío, comp. II. Rodríguez, Víctor, comp. III. Velasco, Marisa, comp. IV. Rodríguez, Víctor, ed. V. Velasco, Marisa, ed. VI. García, Pío, ed.

CDD 121

Fecha de catalogación: Septiembre de 2015

1° Edición

Impreso en Argentina

ISBN: 978-987-707-014-9

Coordinación editorial: Víctor Rodríguez, Marisa Velasco, Pío García

Diseño de interior y tapa: Mariana Biasutti López
nardoambar@gmail.com

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de tapa, puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio, ya sea electrónico, químico, óptico, de grabación o por fotocopia sin autorización previa.

Índice

Prólogo	5
El arduo camino hacia la relatividad general V. Rodríguez	7
La representación visual, 3D y dinámica: las simulaciones computacionales en biología molecular P. Lodeyro - S. Polzella	25
Articulación de modelos, experimentos y simulaciones: la tensión entre reconstrucciones filosóficas y descripciones de prácticas científicas M. Velasco - P. García	45
Sobre los aspectos epistemológicos del rol de las estadísticas en psicología aplicada D. Rabinovic	59
Observabilidad en las prácticas astronómicas M. Bozzoli	81
El problema del supuesto de independencia, desde una mirada de la diagnosis médica X. Huvelle - L. Pesenti	99

El arduo camino hacia la relatividad general*

V. Rodríguez

“El trabajo de Einstein sobre relatividad probablemente excede en audacia todo lo que se ha hecho hasta ahora en ciencia especulativa, y aun en epistemología; la geometría no euclidiana es un juego de niños, en comparación” Planck, 1910.

Introducción

Este trabajo ha sido escrito como un modesto homenaje a la teoría de la relatividad general de Albert Einstein, esa extraordinaria aventura intelectual que cumple su primer centenario (2015). Esta teoría es, sin dudas, una de las más grandes obras del siglo XX. Lo que aquí se hace es una aproximación a la génesis de la misma, con sus especulaciones brillantes y también con sus errores. Éste no es un trabajo de física, sino uno cuyo enfoque pretende inclinarse hacia la historia de la ciencia orientada filosóficamente. Se atiende principalmente a algunos conceptos y episodios que han desempeñado un rol especial en el desarrollo de la teoría, aunque bien podría haberse seleccionado otro conjunto de temas en relación con el mismo período y arribar a idéntico fin. La historia de la relatividad general es muy compleja. Eso es lo que se desprende de las investigaciones de los historiadores, físicos y filósofos dedicados a ella. El período analizado cubre, a grandes rasgos, la búsqueda de este científico en los diez años existentes entre sus dos grandes teorías de la relatividad, la especial y la general. La frase de Planck citada arriba se sitúa en el medio de este período.

La aproximación al tema en este trabajo se realiza desde una perspectiva epistemológica que presta especial atención a la ciencia

* Rodríguez, V. – Velasco, M. – García, P. – (Comps.), 2015, Filosofía de las ciencias y prácticas científicas. ISBN 978-987-707-014-9

como proceso. Bajo el concepto de 'práctica científica', se señala a un conjunto de actividades, tanto teóricas como experimentales, usualmente puestas en contextos más amplios: desde heurísticas individuales con roles epistémicos, hasta connotaciones culturales y sociales asociadas con los descubrimientos o las construcciones científicas en consideración. No obstante, debe señalarse que no se tendrán en cuenta aquí los aspectos sociales asociados con el tema. Solamente se prestará atención a algunas indagaciones que, entre otras, condujeron a esta obra.

De paso, conviene señalar que se trata de un período muy rico para una mirada epistemológica sensible a la generación de nuevas ideas. Se trata de un tortuoso proceso intelectual que se extiende por varios años e involucra a Einstein y a un buen número de sus colegas. A la luz de las investigaciones actuales, a la extraordinaria construcción einsteniana que culmina a fines de 1915, hay que sumar un coro de protagonistas secundarios. Testimonios de este coro son los trabajos en co-autoría de Einstein (con Grossmann, Fokker), las numerosas cartas que intercambió con varios colegas (Planck, Lorentz, Ehrenfest, Sommerfeld, Hilbert, entre otros) y las producciones de otros científicos sobre el mismo tema durante los años en que comienza a construirse la relatividad general (Born, Abraham, Nordström, Mie, Hilbert). Afortunadamente, hoy se cuenta con muy buena documentación al respecto, producto de estudiosos del tema que han llevado a cabo sus investigaciones desde diferentes perspectivas. En particular, los historiadores de la relatividad general han permitido separar también las contribuciones matemáticas de la época de los avances posteriores de las mismas, lo cual permite distinguir numerosas cuestiones lingüísticas, de nomenclatura y estilísticas entre la literatura de comienzos del siglo pasado y el lenguaje actual de esta teoría. A veces, la lectura contemporánea de un tema viejo dificulta la comprensión de episodios importantes de la actividad científica de esa época. Como es natural, a cien años de la creación de esta teoría, se ha escrito realmente mucho sobre el tópico y, consecuentemente, su perfil lingüístico ha cambiado considerablemente. Valga como ejemplo, el contraste entre el lenguaje matemático que uno encuentra en libros de

principios del siglo pasado, como el de Eisenhart (1909), con el estilo que se percibe en alguno reciente; cfr., por ejemplo, Berger (2003). A los efectos de establecer puentes entre tradiciones, a veces es conveniente consultar a historiadores de la matemática un tanto especializados, los que pueden allanar el camino para el tratamiento de casos especiales. Para el tema de este trabajo, una historia de los métodos geométricos, como la de Coolidge (1963), puede brindar una saludable colaboración.

Con respecto a la génesis de esta teoría, hay excelentes libros que reflejan actualmente el estado del arte de las investigaciones sobre su origen; también hay destacadas consideraciones epistemológicas asociadas con este proceso. R. Torretti (1996), J. Norton (1984), entre muchos otros, han hecho contribuciones muy valiosas para la comprensión de las ideas de Einstein y de su entorno en esa época. Dado que, tanto a nivel histórico como epistemológico, el corte temático realizado en este trabajo es grande, destacamos para ulteriores referencias a los volúmenes 2, 4, 5, 6, 7 y 10 de los *Collected Papers* de Einstein (1989, 1996, 1995, 1997, 2002, 2006), así como los cuatro volúmenes sobre la génesis de la relatividad general editados por J. Renn (2007a, 2007b). Cabe acotar que la literatura que se ha ido generando sobre este período es tan numerosa que solamente sus títulos bien pueden llenar un generoso libro. Por supuesto, todo esto dificulta la capacidad de acercamiento a la variedad de interpretaciones que se están haciendo sobre este proceso y este producto. Además, en muchos artículos, las páginas escritas crecen notablemente en función del interés por comprender los tecnicismos formales y conceptuales considerados. Los problemas de interpretación con que se encontraron los investigadores, tanto en física como en matemáticas, han contribuido a generar esa voluminosa literatura.

Atendiendo a esto, el propósito de este capítulo es dar una versión considerablemente superficial, compacta y parcial, de un proceso de especulaciones y cálculos que condujo a la articulación final de esa teoría a fines de noviembre de 1915, dejando fuera de consideración algunas cuestiones conceptuales importantes. Ellas requerirían un tratamiento de no menor extensión que todo este trabajo, sumado a que el autor del mismo no puede dar fe de un pleno

entendimiento de la trama de conceptos y argumentos involucrados allí. Si hay algún rasgo atendible en todo esto, posiblemente sea el énfasis puesto en algunos puntos de tensión en el proceso de construcción de esta teoría. El objetivo ha sido entender y poder transmitir ciertos fragmentos del proceso, tomando como fuente a escritos de Einstein y un conjunto de materiales secundarios. Adicionalmente, se interpreta que este proceso es una buena antesala para comprender ciertos desarrollos ulteriores del programa científico que se edificó en torno de esta teoría y que actualmente contribuye a nuestra imagen del mundo físico.

Entrando en tema, -en la búsqueda de su génesis-, una cuestión que llama la atención es que las preocupaciones de Einstein por extender el principio de relatividad para incluir a la gravitación dentro del esquema que había desarrollado exitosamente en la teoría de la relatividad especial de 1905, son explícitas ya al poco tiempo de elaboración de esta obra. En un artículo cercano temporalmente, (Einstein, 1907), pueden apreciarse algunos conceptos importantes, los que luego se irán precisando y que constituirán parte del andamiaje básico de la teoría de 1915.

El proceso de Einstein durante este período parece haber sido una agotadora búsqueda que se representa, a grandes rasgos, en las siguientes fotografías conceptuales:

Un muestrario de sus ideas y estrategias

En lo que sigue, se usará el signo ‘•’ para señalar núcleos temáticos y metodológicos especiales.

- Hay que destacar las grandes motivaciones que guiaron sus búsquedas. Fue explícito al respecto. La luz constituyó un profundo motivo de reflexión que lo llevó hasta la relatividad especial. En relación con el tema considerado aquí, lo más importante para él fue su indagación sobre la base de la igualdad de la masa inercial y la masa gravitacional. Este tema generó en él un ámbito de indagaciones que lo acompañó durante años, hasta la versión final de su teoría general y probablemente también por un tiempo posterior. Aquí cobra plena

vigencia el rol de un principio como elemento articulador de una teoría, aún cuando ella sea desarrollada posteriormente. Estando en su trabajo, en la oficina de patente en Berna, se le ocurrió la brillante idea de que si una persona está en caída libre, no debería sentir su propio peso. Esto marcó de modo significativo sus investigaciones posteriores. En el año 1907 tenía clara percepción de que en el edificio de la teoría de la relatividad especial no entraba la gravitación. Captaba que, a pesar de la elegancia de la relación entre la inercia y la energía, no había una relación clara entre la inercia y el peso. Esto lo llevó a sospechar del alcance de la teoría de la relatividad especial y, consecuentemente, a intentar extender el dominio relativista para incorporar a la gravitación.

- Se plantea la pregunta si se puede usar de modo válido el principio de relatividad para sistemas que están acelerados, uno respecto de otro. En particular, supone una equivalencia entre un campo gravitatorio y un sistema acelerado, aunque recién varios años después usó el nombre de 'principio de equivalencia'. Por ese entonces, el deseo de incorporar a la gravitación en el esquema conceptual de la relatividad especial era un gran desafío y también un gran enigma. Sin embargo, captó que el campo gravitatorio tiene algo así como una existencia relativa, de modo semejante a un campo eléctrico generado por inducción. Su conjetura se asoció con el hecho aceptado experimentalmente de que los cuerpos caen con la misma aceleración; algo para destacar, por su profundidad filosófica acompañada de una aparente sencillez conceptual. En 1907 ya vislumbra el efecto del corrimiento gravitacional hacia el rojo. Como se ha señalado, allí aparecen insinuados tanto los sistemas Lorentz locales, como la reducción de la constancia de la velocidad de la luz a ámbitos infinitesimalmente pequeños.

- Con un argumento situado en las ecuaciones de Maxwell, deduce que los rayos de luz se curvan en un campo gravitatorio. En otras palabras, ya en 1907 apreciaba que la velocidad de la luz no es una constante en un campo gravitatorio. Esto, más la observación inmediatamente anterior, significó un profundo cambio para el marco del enfoque relativista de 1905.

- Hay un hecho para destacar. Las preocupaciones epistemológicas explícitas suyas de alrededor de 1910 no incluyen todavía a la gravitación. Dicho en otras palabras, aún cuando en su mente estuvieran presente los enigmas que suscitaba la gravitación en relación con la teoría de la relatividad especial, en sus reflexiones de estilo más divulgativo sobre los fundamentos epistemológicos de la teoría de la relatividad de esa época, no aparece la gravitación.

- Hay manifestaciones claras por parte de él, hacia fines de 1907, sobre su interés por resolver el enigma del corrimiento del perihelio del planeta Mercurio, logro que alcanzará recién en noviembre de 1915. La historia de la relatividad general está cruzada por este “cable a tierra”. Una señal de ello es que su solución le llegó apenas unos pocos días antes que la versión final de la teoría. Se señala lateralmente que para un análisis más contextual del tópico, se puede consultar Roseveare (1982).

Los puntos anteriores pueden ser redondeados con una reflexión algo más general de uno de los biógrafos de Einstein, quien desliza este bello y profundo comentario:

El tratamiento dado a la simultaneidad en 1905 fue el resultado de muchos años de pensar, que le llevaron a una nueva interpretación física de la invariancia Lorentz global. Sólo dos años más tarde se dio cuenta de que la extensión del principio de la relatividad especial exigía una revaluación de la validez de su herramienta más preciada. En 1907, ya sabía claramente que algo había incorrecto en esta invariancia, si su principio de equivalencia había de mantenerse en toda su generalidad. No sabía entonces que la invariancia Lorentz volvería en una versión nueva, local. Otros hubieran descartado el principio de equivalencia, para retener la invariancia global. Einstein no. Comenzó por un camino nuevo, con total falta de temor. Durante los ocho años siguientes, no tuvo elección. Debía continuar. Desde entonces, su estilo cambia. Si el trabajo de 1905 tiene la cualidad de Mozart, el trabajo de 1907- 1915 es reminiscente de la de Beethoven. (País, 1984).

Como comentario lateral, debe señalarse que, salvo por alguna carta esporádica, no hay información relevante sobre sus

investigaciones en torno de la gravitación entre 1907 y 1911. Los estudiosos de su obra consideran que ello se debió principalmente a que estaba muy motivado en esa época por los fundamentos de la física cuántica. Sus trabajos escritos de esos años refuerzan esta hipótesis, aunque vale decir que no quedó totalmente satisfecho con esos resultados.

- En febrero y marzo de 1912 escribió dos artículos sobre la gravitación, los que, a pesar de no ser considerados como grandes obras de su producción, muestran su interés por pasar desde un abordaje cinemático de la gravitación a una versión dinámica. Aquí tenemos un tiempo curvo y un espacio plano en el armazón de su teoría. Esta aproximación suya no duró mucho tiempo en su estima, pero allí se observan ya sus dudas sobre la geometría euclidiana, señalando que posiblemente no sean válidas en un sistema en rotación uniforme. Afirma que, bajo alguna determinada definición de longitud, debido a la contracción de Lorentz, la relación de la circunferencia con el diámetro podría ser diferente a n . Pero a pesar de esto, continuó sosteniendo un espacio plano. Se ha conjeturado que el tratamiento del cuerpo rígido puede haberlo influenciado para su consideración posterior de un espacio curvo. Ya la rotación comenzaba a mostrar sus intrigantes complejidades disfrazadas de simplicidad.

- Alrededor de 1912, intuía que el entendimiento de la gravitación podría suponer un camino que trasciende a las transformaciones de Lorentz. Había pasado de una duda sobre su alcance a afirmar que estas transformaciones no son suficientes. Ya desde 1907 sabía que algo andaba mal con ellas, pero no tenía a su disposición una nueva forma de la invariancia Lorentz, local. Éste es otro buen ejemplo del rol de los principios en su convicción. Dadas las dificultades para mantener a la vez a un principio de equivalencia y una invariancia global, Einstein optó por mantener su principio de equivalencia. Es un ejemplo de una heurística con fuerte base epistemológica. Lateralmente, considera la contribución de un principio variacional y también los obstáculos que aparecen para dar una versión armónica conjunta del campo electromagnético y del

campo gravitacional. Este último punto es un enigma que lo va a acompañar durante el resto de su vida.

- Para esta época, sus tanteos lo habían llevado a la firme convicción de que el principio de equivalencia debía incorporarse a las ecuaciones de base de su eventual teoría. Por otra parte, analizando la relación entre la densidad de energía y las leyes de conservación, llegó a aceptar que el lenguaje de la teoría podría ser no lineal. Además, también cambió su percepción del rol del principio de equivalencia, sugiriendo lo que después sería su forma local.

- Alrededor de mediados de agosto de 1912 apareció en Einstein la fuerte conjetura acerca de que su principal herramienta geométrica debía trascender a Euclides. Había descartado una concepción del campo escalar para la gravitación y estaba ansioso de penetrar en algún nuevo lenguaje, más potente y más general. El fantasma que le acechaba era su dificultad para poder dar una versión dinámica de la gravitación, algo todavía lejos de poder realizarse. Esto le produjo oscilaciones en sus apreciaciones, entre optimistas y escépticas. Le aparecía la necesidad de un nuevo lenguaje, pero no se podía siquiera imaginar la forma de las ecuaciones generales en él. Este cambio en su concepción del lenguaje matemático, para ser usado en física, presenta varios interrogantes importantes. El primero de ellos está vinculado con la notable originalidad de su adopción lingüística. Era algo totalmente nuevo en física, frente al cual, aún la relatividad especial quedaba como algo elemental. El asombro y la reverencia de Planck, citada arriba, podrían reforzarse notablemente en relación con este segundo ataque a lo desconocido. Se tiene cierta ayuda suya en relación con el origen de este derrotero. Einstein declaró posteriormente que si todos los sistemas acelerados son equivalentes, la geometría euclidiana no puede ser válida en todos. Aunque eso sea solamente un testimonio de este pensador, lo que parece insinuar es un abanico de nuevas posibilidades expresivas. En su caso, como había estudiado parcialmente a la teoría de las superficies de Gauss, le pareció una puerta plausible. Y aquí entra el matemático Marcel Grossmann. Como su relación con él tenía años de amistad, ante la solicitud de Einstein, Grossmann lo introdujo en el mundo de Riemann

y por él, en los trabajos de Ricci y Levi-Civita. Aunque hay varias lecturas posibles para el estudioso de esta relación, está claro que Einstein no conocía a estos autores ni a sus obras. Según Einstein, él le propuso a Grossmann la búsqueda de tensores covariantes cuyas componentes dependieran sólo de las derivadas de los coeficientes de un invariante cuadrático. Al parecer, más allá de su ayuda concreta, Grossmann le planteó que las ecuaciones con que iba a encontrarse en el mundo de Riemann son no lineales, pero Einstein no tomó a esto como un signo negativo, sino como algo que estaba en fase con sus investigaciones previas, ya que el campo gravitatorio actúa como su propia fuente. En relación con el mundo de Riemann, Einstein señaló después que en un sistema de referencia que gira con respecto a un sistema inercial, debido a la contracción de Lorentz, las leyes para los cuerpos rígidos no encajan con la geometría euclidiana, aunque no trabajó sobre esto hasta después de la formulación de la teoría final.

La consecuencia de esta interacción con Grossmann fue la producción de algunos trabajos en colaboración; aquél, como matemático y Einstein, como físico, aunque a esta altura ya estaba mostrando indicios de un cambio en la valoración de la matemática para el mundo físico. Aunque el tema presenta varias dificultades interpretativas, puede decirse que esta colaboración hizo avanzar decididamente la elaboración de la nueva teoría. Pero éste es un paso delicado que requiere algo más de atención. A la parte matemática sobre la geometría de Riemann y el cálculo tensorial, hecha por Grossmann, Einstein le agrega su enfoque de la covariancia general. Pero el enfoque general está constreñido por la necesidad de considerar el límite newtoniano. No se podía ignorar la lectura de Newton si uno miraba al mundo 'en grano grueso'. Pero, a pesar de este avance matemático significativo, se mantenía la pregunta sobre cuáles eran las ecuaciones de campo. Aquí hubo tanteos y errores, de Grossmann y de Einstein. Se encontraron restricciones a la covariancia general; al parecer, se tuvo una percepción algo errónea de ciertas entidades matemáticas, -para el lector familiarizado con el lenguaje técnico, hubo problemas con el rol del tensor de Ricci y también con las

identidades de Bianchi- y, lo más raro, es que Einstein forzó una justificación de por qué no se podían tener ecuaciones generalmente covariantes para el campo gravitatorio. Además, no estaba claro el significado de la elección de las coordenadas; si era algo convencional o no.

- En 1913, en sus tanteos en la oscuridad, Einstein llegó a afirmar que se puede demostrar que no pueden existir ecuaciones covariantes que determinen el campo gravitatorio desde el tensor de materia, apelando en su argumento a las leyes de conservación. No obstante, aún lejos de ser enteramente consistente, su teoría mostraba rasgos de madurez y, vista en retrospectiva, se puede percibir cuán cerca estaban de la que después sería expuesta como la versión final. En síntesis, en los pocos trabajos de Einstein y Grossmann, se oscila entre la linealidad y la no linealidad, entre la matemática y la física, entre la covariancia total y una covariancia parcial. Ellos habían supuesto que las ecuaciones del campo gravitatorio solamente son covariantes con respecto a transformaciones lineales. Pasada la mitad de ese año, sus vacilaciones con respecto al logro de la empresa eran muy notables. En realidad, Einstein lamentaba la pérdida de la covariancia general. Llegó incluso a decir que toda su construcción estaba en el aire; en realidad, era un aire de desorientación apreciable, a pesar del talento, la obstinación y el esfuerzo puesto en la empresa.

- Un punto que conviene señalar es que Einstein discutió sus ideas incesantemente con varios colegas y recibió valiosos aportes de ellos, aunque más no fuera, para pulir sus propios pensamientos.

Max Abraham fue uno ellos (Abraham, 1912a, 1912b, 1912c, 1912d, 1912e), aún cuando su construcción teórica quede hoy eclipsada por el éxito de la de su contrincante. Cabe señalar aquí que una característica de Einstein fue la firmeza de sus convicciones y la confianza en las estrategias en una física basadas en principios. Una de sus críticas importantes a Abraham fue que su sistema de ecuaciones no podía establecerse en acuerdo con 'la hipótesis de la equivalencia'. Siguiendo el pensamiento de Einstein, los esfuerzos de Abraham le sirvieron para consolidar su programa teórico, fundamentalmente a

nivel epistemológico. En respuestas posteriores a Abraham, e intentando esclarecer sus puntos de vista lo más posible, siguió sosteniendo el principio de relatividad de 1905, pero el otro de sus principios centrales, la constancia de la velocidad de la luz, debió ser abandonado en el caso de los sistemas no inerciales.

Distinto fue el caso de Gunnar Nordström (Nordström, 1912, 1913a, 1913b), quien propuso una teoría que impresionó a Einstein como mucho más consistente que lo hecho hasta 1912. Exploró algunas consecuencias de mantener el principio de la constancia de la velocidad de la luz, ya que sin ella la relatividad presentaba grandes dificultades y elaboró un sistema de ecuaciones que servirían como una base aparentemente completa para la teoría de la gravitación.

La situación ofrecía un menú de opciones y Einstein, reconociéndole méritos al enfoque de Nordström, intentó esclarecer el panorama exponiendo en 1913 un pequeño mapa de la situación en que se encontraban y de las opciones que se podían seguir. Consideró cuatro postulados generales que podrían ser válidos en una teoría de la gravitación: a) se satisface la conservación energía-momento, b) las masas inercial y gravitacional de sistemas cerrados son iguales, c) vale la relatividad especial, d) las leyes de la naturaleza no dependen del valor absoluto del potencial gravitacional. Consideró que a) debería ser aceptado en general; b) debería ser aceptado debido a la evidencia experimental; que c) no sería válido, con excepción de regiones de potencial gravitacional constante; y que d) podría solamente justificarse por la simplicidad que tienen las leyes de la naturaleza cuando se aplica este postulado. Como la teoría de Nordström se deriva de un potencial escalar y es acorde con estos postulados, Einstein la consideró como la más natural, conjuntamente con la propuesta que él estaba construyendo en colaboración con Marcel Grossmann.

Desde el punto de vista de Einstein, la situación con respecto a la teoría escalar de Nordström se presentaba de la siguiente manera: reconociendo que ella acepta el postulado de la constancia de la velocidad de la luz y satisface los requerimientos exigidos para una teoría de la gravitación atendiendo al conocimiento experimental de

que se disponía, señala como la única cuestión insatisfactoria el hecho de que en esa teoría la inercia de un cuerpo parece estar afectada, pero no producida, por otro cuerpo. Pero la estrategia de Einstein aquí fue novedosa y algo audaz. Con Grossmann persiguieron otro intento de teoría consistente de la gravitación atendiendo al uso de un nuevo aparato matemático, la teoría invariante del cálculo diferencial absoluto. Esta estrategia les permitía una lectura formalmente mucho más clara de la teoría de Nordström y también determinar la influencia del campo gravitacional sobre fenómenos físicos arbitrarios sin invocar nuevas hipótesis. Einstein estaba muy motivado por esta nueva estrategia. En particular, consideraba que con ayuda del tensor de Riemann-Christoffel que había comenzado a manejar, quizás se podían derivar las ecuaciones de Einstein-Grossmann para la gravitación de modo independiente de suposiciones físicas. Estimaba que la demostración de la existencia o no existencia de tal conexión podría suministrar avances teóricos relevantes.

Otro científico que intervino en la escena fue Gustav Mie. Sus trabajos (Mie, 1912a, 1912b, 1913) tuvieron influencia considerable en el programa de Hilbert hacia las ecuaciones de campo, como se considerará más adelante. Elaboró una teoría sobre el electrón, aceptó el principio de relatividad y en cierto modo realizó una generalización del espacio-tiempo de Minkowski. Pero Einstein no estimó a su enfoque de gran valor y las discrepancias entre ellos les generaron una fuerte disputa.

- En una serie de idas y vueltas, por una breve conexión con Fokker, surgió un trabajo en esa época en el que aparecía la covariancia general, además de cierto reconocimiento de la incorrección de algún argumento usado por el propio Einstein y por Grossmann. Todo impresiona como que se estaba cerca de una teoría finalmente consistente, aunque para ella todavía eran necesarios varios pasos.

- En un trabajo de 1914, Einstein deduce la ecuación geodésica para el movimiento de una partícula y también muestra que tiene un límite newtoniano correcto. Allí también expresa que no existen cualidades independientes del espacio, enfatizando la importancia del

nuevo concepto de espacio-tiempo. Los estudiosos han encontrado aquí una pequeña fuente de errores, tanto con respecto a su concepción de la causalidad, -algo muy difícil de entender sin un análisis pormenorizado-, como cierta falta de comprensión de su parte sobre la naturaleza de los tensores. Aquí aparece la interacción suya con Levi-Civita, quien supo señalarle algunos puntos matemáticos relevantes.

- El período que va desde aquí hasta el otoño de 1915 es un período tortuoso. Llegó a escribirle a Hilbert que se daba cuenta que los métodos de demostración que había usado no eran confiables. No obstante, al parecer, hasta mediados de ese año todavía creía en la versión de la teoría que tenía en sus manos. Este nuevo cambio en su concepción, que ocurrió en la segunda mitad de 1915, parece haber estado motivada por lo que él llamó 'objeciones' a la teoría previa. Una objeción era que la covariancia restringida no incorporaba a las rotaciones uniformes. Otra era que el cálculo para el perihelio de Mercurio daba un resultado menor que el que debía esperarse, y la tercera era que había demostrado mal la unicidad del lagrangiano gravitacional.

- Los cuatro artículos de noviembre de 1915 producen una sensación de respeto y admiración, sobre todo por el ritmo vertiginoso de la mente de su creador. Cuatro de noviembre, once de noviembre, dieciocho de noviembre y veinticinco de noviembre. Éstas son las fechas en que presenta sus cuatro artículos, en los que expresa el cambio recientemente gestado en su concepción de la teoría anterior suya, corrige sus errores previos, calcula correctamente el perihelio de Mercurio y, pocos días después, da una versión consistente de la teoría propuesta. Según su prosa, la teoría estaba cerrada como estructura lógica.

Los acontecimientos de noviembre nos llevan a una consideración más general. Entre otras cosas, en relación con el perihelio de Mercurio, ilustran que la predicción se puede presentar por diferentes vías y en diferentes grados. Se puede obtener un contexto predictivo desde una teoría formalmente completa, pero también, desde otra teoría quizá más anclada en aspectos

fenomenológicos y no totalmente desarrollada en sus formalismos. A veces, no se alcanzan a distinguir los rasgos diferenciales entre estas teorías en competencia; en particular, cuando los límites observacionales o experimentales obligan a la convivencia de las eventuales concepciones alternativas. También puede suceder que el cálculo numérico no sea correcto, pero los conceptos que introduce la teoría que produce este cálculo sean de gran valor epistémico posterior.

- Un párrafo para la contribución de Hilbert. En general se acepta que Hilbert llegó a las ecuaciones de campo de la relatividad general unos pocos días antes que Einstein. Ha habido bastante consenso sobre esto, fundamentalmente en relación con las ecuaciones fundamentales de la teoría. Pero dadas las dificultades de interpretación existentes, sobre todo en el lenguaje matemático de Hilbert, esto es material para otro artículo. En este trabajo se ha intentado solamente seguir algunos pasos generales de Einstein hacia su gran obra y no hay dudas de que su arribo a ella fue producto de su motor intelectual propio. Mehra (1974), Corry et al. (1997), Logunov et al. (2004), entre otros, se han ocupado bastante del tema. Sin embargo, por la envergadura del mismo, no es posible dejar de considerar algunos puntos relevantes, aunque más no sea para dar un contexto a la producción de Einstein dentro del perfil seguido aquí. Einstein presentó a la Academia Prusiana su versión final de la teoría de la gravitación el 25 de noviembre de 1915. Hilbert había presentado sus ecuaciones en Gotinga cinco días antes. Su intención fue dar una versión axiomática que incluyera la gravitación einsteniana y el electromagnetismo en el estilo de la versión elaborada por Mie. Einstein, quien estaba en estrecho contacto con Hilbert en esa época, observó a los pocos días que la teoría de Mie no era necesaria, si nos situáramos en la relatividad general, y llegó a considerar como poco interesante el enfoque de Hilbert. Einstein estuvo en Gotinga unos meses antes dando unas disertaciones sobre relatividad general y en esa ocasión estuvo en contacto con Hilbert. Todavía estaba lejos de la versión final. Durante noviembre, hubo una intensa correspondencia

entre ambos. Hilbert lo felicitó por haber resuelto el problema de perihelio de Mercurio y también le comunicó su versión de las ecuaciones de campo, conjuntamente con su programa axiomático. Como esta trama es muy compleja, aun para los especialistas, es conveniente cerrar el punto señalando que hay cierto consenso en que a Einstein se le da la paternidad de la relatividad general, pero que tanto él como Hilbert pueden ser asociados, aunque de modo independiente, con ecuaciones centrales de la teoría. Como esto continúa siendo un tema de investigación, cabe señalar que Hilbert reconoció a Einstein la paternidad de la teoría, llegando incluso a considerarla como “la más importante creación del espíritu humano desde siempre”.

Comentarios finales

No se han explorado en este trabajo las implicaciones del enfoque de Mach sobre el pensamiento de Einstein en torno de la relatividad general, el cual ha merecido numerosos tratamientos eruditos. Cfr., por ejemplo, Hofer (1994), Renn (1994), Barbour (1992). Tampoco se ha considerado el argumento del agujero de Einstein, porque el mismo merecería un tratamiento bastante detallado y ello escapa a las dimensiones de este trabajo. Se puede consultar a J. Stachel (2014) para una versión actualizada del mismo.

Como se ha señalado arriba, la literatura sobre la obra del científico destacado aquí es enorme. Es difícil ser experto en ella. En función de esto, lo que se ha intentado hacer es brindar ciertas pinceladas sobre este pensador y sus productos, atendiendo a una suerte de dinámica de cambio teórico involucrada en sus procesos indagatorios. Un buen rostro humano de esta dinámica queda reflejado en este comentario suyo, con el que se cierra este capítulo,

...los años de búsqueda en la oscuridad de una verdad que se siente, pero no puede expresarse, el deseo intenso y las alternativas de confianza y desánimo hasta que uno irrumpe a la claridad y la comprensión, son solamente conocidos por quien los haya experimentado por sí mismo.

Bibliografía

- Abraham, M. (1912a) Zur Theorie der Gravitation. *Phys. Z.* 13, pp. 1-4, 176.
- (1912b) Das Elementargesetz der Gravitation. *Phys. Z.* 13, pp. 4-5.
- (1912c) Der freie Fall. *Phys. Z.* 13, pp. 310-311.
- (1912d) Die Erhaltung der Energie und der Materie im Schwerkraft Felde. *Phys. Z.* 13, pp. 311-314.
- (1912e) Das Gravitationsfeld. *Phys. Z.* 13, pp. 793-797.
- Berger, M. (2003) *A Panoramic View of Riemannian Geometry*. Springer-Verlag, Berlin.
- Barbour, J. (1992) Einstein and Mach's Principle. En: J. Eisenstaedt, A. Kox (eds.) *Studies in the History of General Relativity*. The Center for Einstein Studies, 1992.vol. 3, pp. 125-153. Birkhäuser, Boston.
- Corry, L.; Renn, J. y Stachel, J. (1997) Belated Decision in the Hilbert-Einstein Priority Dispute. *Science* 278, pp. 1270-1273.
- Coolidge, J. (1963) *A History of Geometrical Methods*. Dover Publ., Inc. New York.
- Eisenhart, L. (1909) *A Treatise on the Differential Geometry of Curves and Surfaces*. Ginn and Company, Boston.
- Einstein, A. (1907) "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen". *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, No 4, pp. 411-462.
- (1989) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 2. The Swiss Years Writings, 1900-1909*. Princeton University Press, Princeton.
- (1995) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 5. The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914*. Princeton University Press, Princeton.
- (1996) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 4. The Swiss Years: Writings, 1912-1914*. Princeton University Press, Princeton.

- (1997) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 6. The Berlin Years: Writings, 1914-1917.* Princeton University Press, Princeton.
- (2002) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 7. The Berlin Years: Writings, 1918-1921.* Princeton University Press, Princeton.
- (2006) *The Collected Papers of Albert Einstein. Vol. 10. The Berlin Years: Correspondence, May – December 1920, and Supplementary Correspondence, 1909-1920.* Princeton University Press, Princeton.
- Hofer, C. (1994) Einstein's Struggle for a Machian Gravitation Theory. *Stud. Hist. Phil. Sci., Vol 25, No. 3, pp. 287-335.*
- Logunov, A.; Mestvirishvili, M. y Petrov, V. (2004) How Were the Hilbert – Einstein Equations Discovered? arXiv:physics/0405075v3 [physics.hist-ph] 16 Jun.
- Mehra, J. (1974) *Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation.* D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
- Mie, G. (1912a) Grundlagen einer Theorie der Materie (I). *Ann. Phys. (Leipzig) 37, 511-534.*
- (1912b) Grundlagen einer Theorie der Materie (II). *Ann. Phys. (Leipzig) 39, pp. 1-40.*
- (1913) Grundlagen einer Theorie der Materie (III). *Ann. Phys. (Leipzig) 40, pp. 1-66.*
- Nordström G. (1912) Relativitätsprinzip und Gravitation. *Phys. Zeitschr., No 13, pp. 1126-29.*
- (1913a) Träge und Schwere Masse in der Relativitätsmechanik. *Ann. der Phys., No 40, pp. 856-78.*
- (1913b) Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzip. *Ann. der Phys., No 42, pp. 533-54.*
- Norton, J. (1984) How Einstein found his field equations: 1912-1915. *HSPS, p. 14,2.*
- Pais, A. (1984) 'El Señor es sutil...' *La ciencia y la vida de Albert Einstein.* Ed. Ariel, S.A., Barcelona.

- Renn, J. (1994) *The Third Way to General Relativity. Einstein and Mach in Context. Preprint 9. Max-Planck Institut for the History of Science.*
- (Ed.) (2007a) *The Genesis of General Relativity. Vol. 1 - 2. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol 250. Springer, Dordrecht.*
- (Ed.) (2007b) *The Genesis of General Relativity. Vol. 3 - 4. Boston Studies in the Philosophy of Science, vol 250. Springer, Dordrecht.*
- Roseveare, N.T. (1982) *Mercury's Perihelion from Le Verrier to Einstein. Oxford Univ. Press.*
- Stachel, J. (2014) *The Hole Argument and Some Physical Implications. Living Reviews Relativity 17, 1. <http://www.livingreviews.org/lrr-2014-1>. Doi:1012942/lrr-2014-1.*
- Torretti, R. (1996) *Relativity and Geometry. Dover Publications, Inc. New York.*