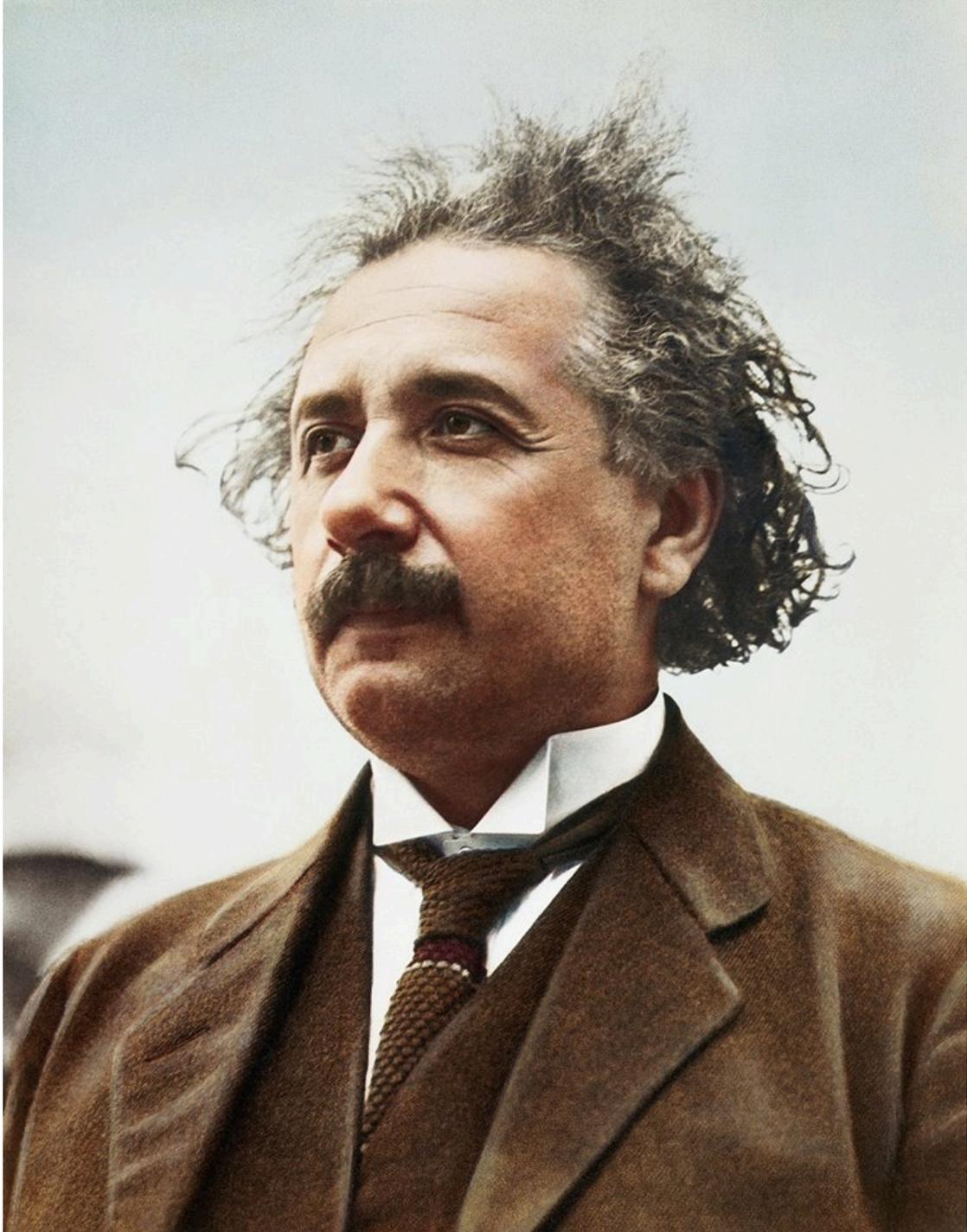


Un siglo de Relatividad General

Gustavo E. Romero



El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein envió a publicar a los Anales de la Academia Prusiana de Ciencias (*Preussische Akademie der*

Wissenschaften, Sitzungsberichte) su artículo titulado *Feldgleichungen der Gravitation*. Este artículo, el último de una serie de 4 enviados ese mismo mes, con diferencia de días apenas, contenía las ecuaciones de campo de la Teoría General de la Relatividad. Esta teoría era una teoría del espacio, el tiempo y la gravitación que reemplazaba el anterior intento de Einstein y Marcel Grossmann conocido con la teoría *Entwurf* (bosquejo), publicada en 1913. La nueva teoría podía explicar el corrimiento anómalo del perihelio de Mercurio y, además, predecía una desviación de 1.43 segundos de arco para la luz de estrellas de campo que fuesen observadas sobre el borde del disco solar durante un eclipse. Las ecuaciones de campo eran la culminación de una búsqueda de 8 años por parte de Einstein. Años fecundos, tanto en descubrimientos como decepciones y fracasos. El camino hacia la Relatividad General, la nueva teoría de campo de la gravitación, que desbancaría a la de Newton, había comenzado en 1907, cuando Einstein aún era un empleado en la oficina de patentes de Berna, Suiza. Ese año, debido a las discusiones en ámbitos científicos originados por el trabajo publicado por Einstein sobre la Relatividad Especial, teoría que trataba de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, Johannes Stark, editor de la revista Anuario de Radioactividad (*Jahrbuch der Radioaktivität*), pidió a Einstein que escribiera una exposición de su teoría e ideas sobre la relatividad de la simultaneidad. Einstein tomó la oportunidad para profundizar en las posibilidades futuras de la teoría, y se planteó el siguiente problema: ¿Cómo extender la teoría de la Relatividad Especial para que pueda aplicarse a todos los sistemas de referencia y no sólo a los inerciales – esto es, a aquellos que entre ellos están en movimiento uniforme? Para responder, Einstein trató de entender qué es lo que caracteriza a un sistema acelerado. Eso lo llevaría a darse cuenta que es imposible diferenciar entre un campo gravitacional uniforme y un sistema uniformemente acelerado: gravitación e inercia parecen ser dos aspectos de un mismo fenómeno. Así como electricidad y magnetismo son dos aspectos de un único campo, el campo electromagnético, gravitación e inercia, Einstein entendió, son dos aspectos de un campo gravito-inercial. A este descubrimiento, que elaboró en el llamado Principio de Equivalencia, le llamó “el más feliz pensamiento de mi vida”. El camino que llevaría a la primera teoría de campo gravitacional de la historia, había comenzado en el apartamento de Berna, donde Einstein escribió aquel artículo para la revista de Stark.

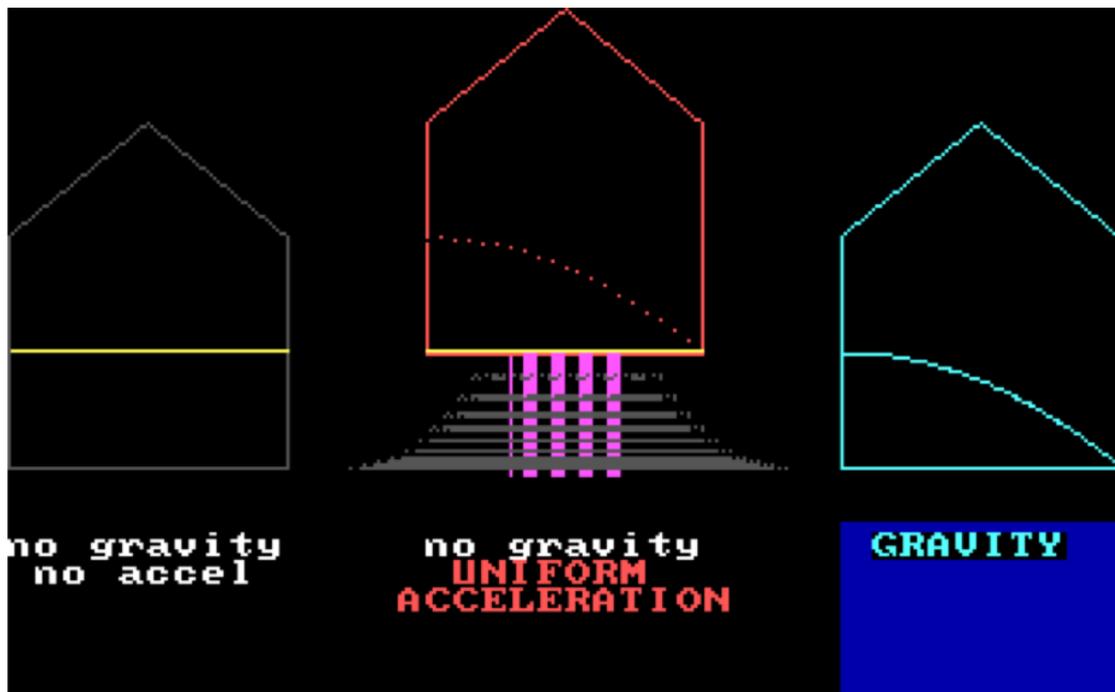


El apartamento de Berna, donde Einstein descubrió el Principio de Equivalencia y empezó el largo y arduo camino hacia la Relatividad General. Fotografía del autor.

El Principio de Equivalencia puede enunciarse así: “Todo campo gravitacional es localmente equivalente a un sistema inercial.” En otras palabras, no hay experimento local alguno que nos permita diferenciar entre un sistema en caída libre en un campo gravitacional y uno que no está sujeto a la acción gravitatoria.

El problema que enfrentaba Einstein ahora era como representar matemáticamente al nuevo campo gravitacional, y luego determinar las ecuaciones que definen dicho campo. El modelo a seguir, para Einstein, era la teoría del campo electromagnético de Maxwell, en su formulación moderna debida a Heaviside y a Lorentz.

En 1911 Einstein es nombrado Profesor Titular de la Universidad Alemana de Praga. En esa ciudad, a la que se muda con su familia, imagina dos experimentos mentales que le darán la clave de los progresos futuros. Primero, imagina que un ascensor uniformemente acelerado es indistinguible de un campo gravitacional, y luego se pregunta que pasaría con un rayo de luz que se mueva por el mismo. Como se ve de la figura que sigue, la respuesta es que el rayo de luz se curva. La conclusión, al aplicar el Principio de Equivalencia, es que la luz se desvía de las trayectorias rectas por la gravedad.



La trayectoria de la luz es curvada por la acción de la gravedad: consecuencia del Principio de Equivalencia.

La otra conclusión a la que llegó Einstein en Praga fue que la geometría del espacio en presencia de gravedad no puede ser euclídea. En otras palabras, cuando hay gravedad la longitud de un círculo no puede ser $2\pi R$. Para verlo, imaginemos un círculo rotando. La velocidad tangencial depende del radio y las distancias se contraen con la velocidad, de acuerdo con la Relatividad Especial. O sea que el perímetro, debido a la rotación, pasa de valer $2\pi R$ cuando el disco está en reposo, a valer $2\pi R$

$\sqrt{(1-v^2/c^2)}$; entonces, cuando la velocidad es cercana a la de la luz, la longitud es más corta que cuando está en reposo. Ahora bien, todo sistema rotante es equivalente a un sistema gravitacional, debido que la fuerza centrífuga y la gravitación son dos manifestaciones del mismo campo gravito-inercial por el Principio de Equivalencia. Luego, la geometría en presencia de gravedad no puede ser la de Euclides ... pero entonces ¿cómo determinarla? Un colega de Einstein en Praga, el matemático Georg Pick (1859-1942) sugirió a Einstein que para hallarlo debería usar la geometría de Riemann y el llamado cálculo tensorial, que entonces era desconocido para los físicos.

Al poco tiempo, Einstein volvió a Zürich como Profesor Titular de su *alma mater*, la Escuela Politécnica, o ETH. Allí se reencontró con su compañero de estudios y viejo amigo Marcel Grossmann (1878-1936). Grossmann había sido quien le consiguió a Einstein, a través de contactos de su padre el trabajo de inspector de patentes en Berna. Ahora era Profesor de Matemáticas en el ETH, y su especialidad era justo el análisis tensorial. Pronto Einstein explicó a Grossmann sus problemas para formular matemáticamente su teoría de la gravitación, y Grossmann profundizó en los trabajos de Riemann y Ricci. En los meses siguientes, ambos amigos desarrollaron el aparato matemático necesario para tratar a la gravitación como un campo tensorial caracterizado por 10 coeficientes diferentes, que definen la forma de medir las distancias en el espacio-tiempo. La idea básica era que la geometría de ese espacio-tiempo no está fija, sino que depende de cómo se distribuyen la masa y la energía de los sistemas físicos. Así, el espacio y el tiempo cambian en presencia de objetos muy masivos, y al cambiar, la distancia más corta entre dos puntos deja de ser una línea recta, y pasa a ser una curva. Los cuerpos se mueven sobre esas curvas en el espacio-tiempo, y eso es lo que llamamos gravedad. La gravedad es reemplazada como fuerza por la geometría del espacio-tiempo. Einstein y Grossmann postularon, sin embargo, ecuaciones para determinar el campo gravitacional que no mantenían su forma en todos los sistemas de coordenadas. Esta teoría sería conocida como la teoría *Entwurf*. Al poco tiempo de publicado el trabajo de Einstein y Grossmann, Einstein fue nombrado miembro de la Academia Prusiana de Ciencias, el organismo más importante de la ciencia de su época. Einstein aceptó en nombramiento, que fue realizado por el Kaiser, y se mudó a Berlín. En los meses siguientes defendió la teoría *Entwurf*, pero pronto empezó a tener dudas sobre la validez de sus ecuaciones básicas. En junio de 1915, ya estallada la guerra mundial, Einstein fue invitado por David Hilbert, el más grande matemático del mundo, a dar una serie de conferencias sobre su teoría de la gravitación en Göttingen. Einstein se sorprendió al constatar que todos allí conocían su teoría y en

las discusiones subsiguientes, sus dudas sobre las ecuaciones básicas aumentaron.

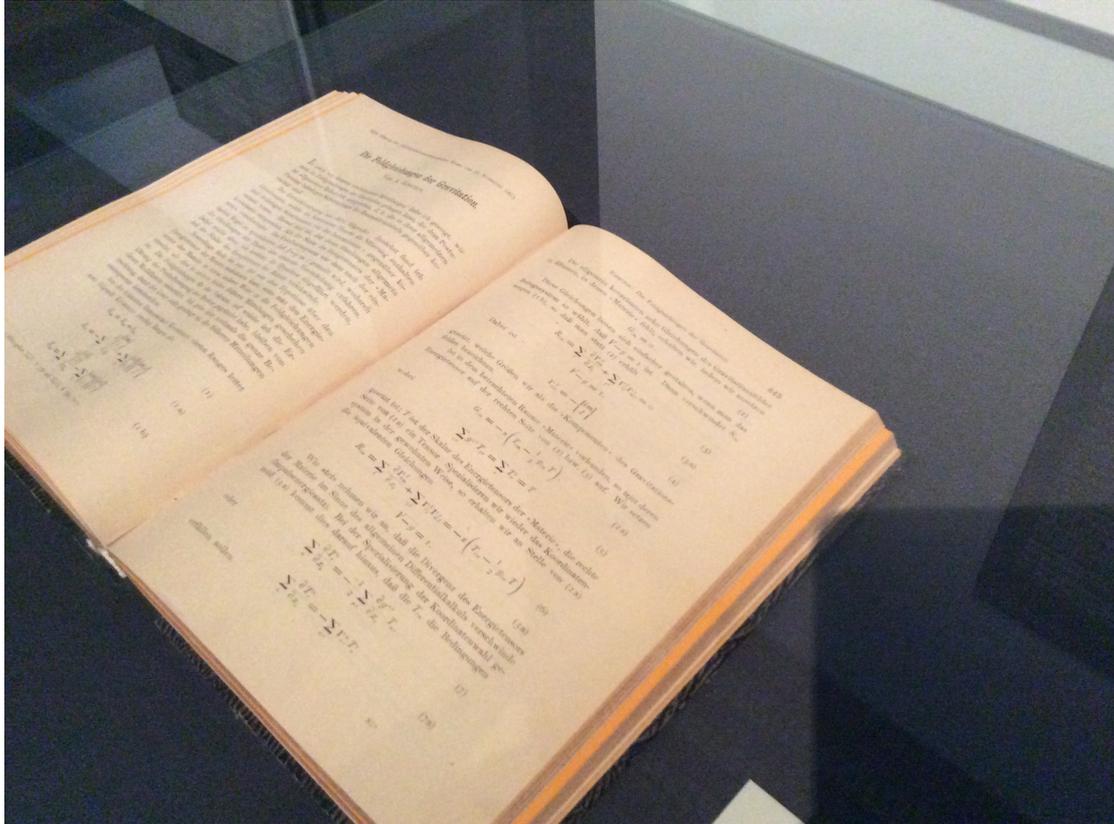


Einstein y Hilbert.

En los meses siguientes, Hilbert se lanzó a encontrar ecuaciones generales para el campo gravitacional. Einstein, por su parte, pronto se dio cuenta de que las ecuaciones de la teoría *Entwurf* no podían predecir el corrimiento anómalo del perihelio de Mercurio. Las ecuaciones debían ser abandonadas. Einstein ahora sentía que Hilbert le pisaba los talones en la búsqueda de ecuaciones tensoriales generalmente covariantes (válidas en cualquier sistema de coordenadas). En un esfuerzo extraordinario, Einstein prácticamente no salió de su estudio por todo el mes de noviembre de 1915. Luego reconocería que fue el mayor esfuerzo de su vida. Sólo se escribía con Hilbert. En rápida sucesión fue capaz de volver a considerar ecuaciones covariantes, resolvió las mismas en primera aproximación para el vacío y obtuvo el valor correcto del movimiento del perihelio de Mercurio: 43 segundos de arco por siglo.

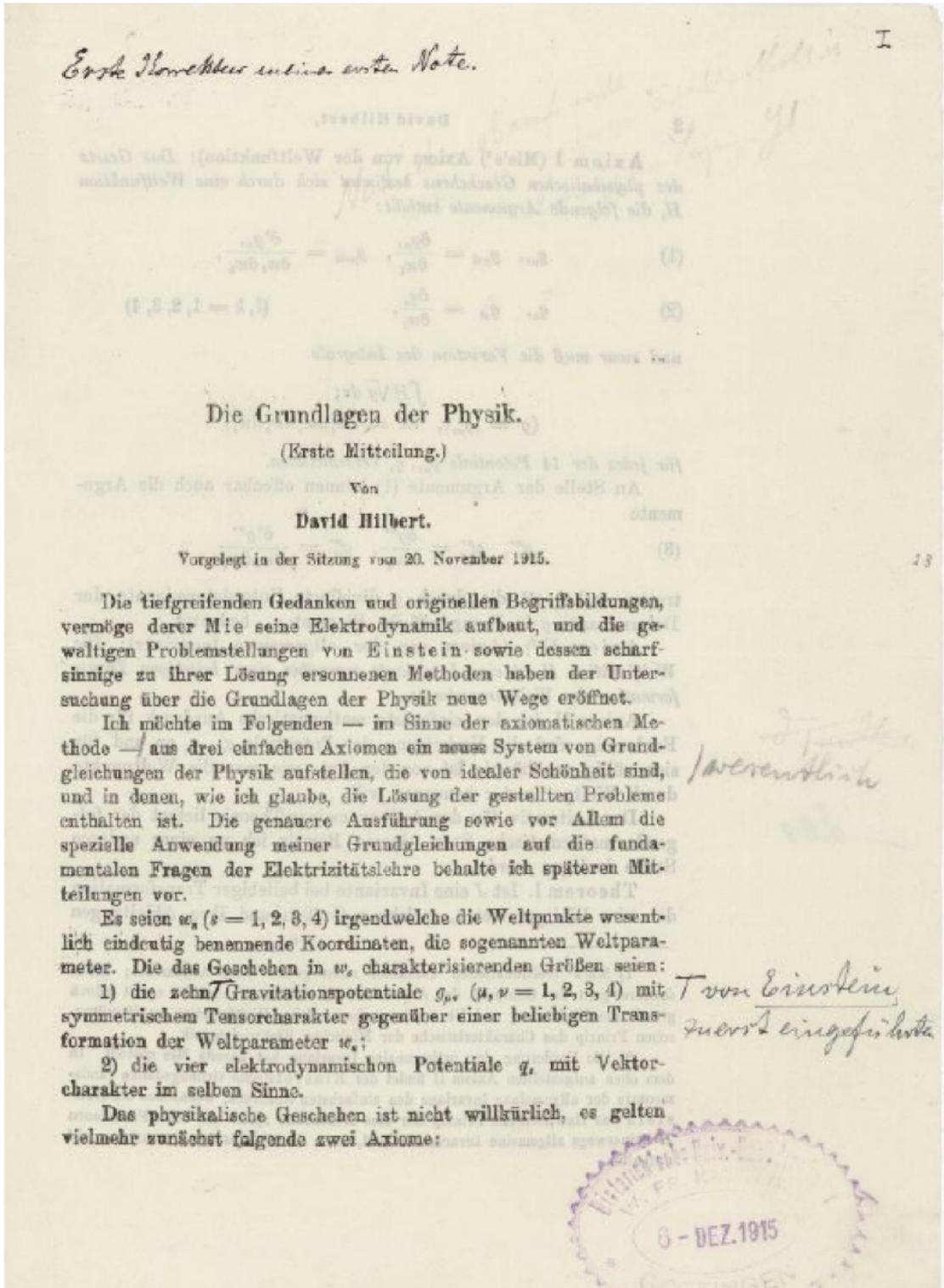
Lo único que le faltaba a Einstein era dar con las ecuaciones en presencia de materia. El 25 de noviembre logró deducir la conservación de la energía de sus ecuaciones y probar lo que hoy llamamos identidades de Bianchi (descubiertas primero por este matemático, pero ignoradas por Einstein), y llegó a la forma final de las ecuaciones. Escribió rápidamente un artículo, y ese mismo día lo envió a los *Preussische Akademie der*

Wissenschaften, Sitzungsberichte. Las ecuaciones 2a de su manuscrito daban la forma del campo gravitacional en función de la energía e impulso de la materia. Hoy son conocidas como Ecuaciones de Einstein. La teoría General de la Relatividad había nacido.



Ejemplar original de los *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte* de noviembre de 1915. Pueden verse las ecuaciones 2a, hoy conocidas como “Ecuaciones de Einstein”. Fotografía del autor.

Entre tanto, Hilbert había enviado el 20 de noviembre a publicar su artículo titulado “Los Fundamentos de la Física”. El artículo salió publicado en marzo de 1916, pero desde entonces mucho se discutió sobre quien tuvo la prioridad del descubrimiento de las ecuaciones. Hoy se ha probado que la prioridad es de Einstein, ya que Hilbert no incluyó las ecuaciones en la primera versión de su trabajo enviado el 20 de noviembre. Recién lo hizo luego de ver el trabajo de Einstein, al corregir las pruebas de su trabajo, el 6 de diciembre de 1916. Hilbert siempre lo reconoció así, pero muchos historiadores pusieron en duda el origen de las ecuaciones, hasta que las pruebas fueron encontradas recientemente en Berlín.



Pruebas de galera del trabajo de Hilbert *Die Grundlagen der Physik*, con correcciones manuscritas del propio Hilbert y el sello que indica la fecha de emisión de las mismas: 6 de diciembre de 1915.

El desarrollo de la Gran Guerra no pudo evitar que las noticias del trabajo de Einstein llegaran a Inglaterra. El holandés Wilhelm de Sitter leyó el artículo, y pudo comentar lo esencial de éste al astrónomo real de

Inglaterra, Arthur Eddington. Luego de la Guerra, en 1919, este último comandó una expedición a la Isla Príncipe, donde pudo medir la deflexión de la luz de estrellas de fondo predicha por Einstein con sus nuevas ecuaciones: 1.745 segundos de arco. Fue la primera de muchas corroboraciones de la Relatividad General, que aún hoy, exactamente 100 años después, es la mejor teoría de la gravitación que tenemos.



Einstein en el Observatorio de La Plata, el 2 de abril de 1925, con un periodista del diario El Día.