

punto de vista (sistema de referencia) del mismo electrón éste se halla evidentemente en reposo. Debido a su carga eléctrica, existirá entonces un campo eléctrico a su alrededor y sólo eso. Pero desde cualquier otro sistema de referencia en movimiento uniforme respecto al electrón, este último se estará moviendo y será equivalente a una corriente eléctrica (de un único electrón). Se sabe que las corrientes generan campos magnéticos y como resultado veremos una mezcla de campos eléctrico y magnético como mencionáramos más arriba.

El año 1905 fue el comienzo de lo que sería uno de los mayores cambios conceptuales del siglo XX. Con la relatividad, la naturaleza del espacio y del tiempo cambiaron completamente, reemplazando ideas y teorías que parecían firmes y bien comprendidas desde los tiempos de Galileo y Newton. La relatividad obligó al hombre a dejar de lado sus ideas preconcebidas sobre la naturaleza de las mediciones de distancias y de tiempos, y lo llevó a que mirase con nuevos ojos los conceptos de simultaneidad y causalidad. Como lo expresara delante de la 80ª Asamblea de los Físicos Alemanes de la ciudad de Colonia en 1908 el matemático ruso Hermann Minkowski (1864-1909), quien fuera profesor de Einstein,

“El espacio por sí solo y el tiempo por sí solo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y sólo una suerte de unión entre los dos preservará una realidad independiente.”

Esta nueva entidad, el espacio-tiempo, fue lo que el genio de Einstein propuso como nuevo marco para la descripción de toda la física. Su trabajo de 1905, uno entre otros importantes que publicara el mismo año, perdurará como un clásico de la historia de la física y de la cosmología.

## EL ESPACIO-TIEMPO SE CURVA: LA RELATIVIDAD GENERAL

*“A mí me aplauden porque todos me comprenden, y a usted porque nadie lo comprende.”*

Charlie Chaplin a Einstein, Los Angeles, 1931<sup>5</sup>

5. Comentario de Chaplin al padre de la relatividad, al recibir juntos el afecto de la multitud en ocasión del estreno del film *Luces de la Ciudad*, el 30 de enero de 1931 en Los Ángeles. Cuenta la leyenda que unos 240 años antes, pero esta vez en una de las callejuelas de Cambridge, Inglaterra, y al cruzárselo a Newton, un estudiante comentó

En los diez años que siguen a su trabajo sobre la teoría especial, Einstein pacientemente desarrolla su teoría completa en donde, además, da cuenta de la gravitación. Esta teoría, llamada la *teoría general de la relatividad* acarrearía profundas implicaciones en todos los aspectos de las ciencias físicas. En particular, las leyes newtonianas deberían sufrir cambios, tanto más notables cuanto mayores fueran las velocidades y las masas (o energías) implicadas.

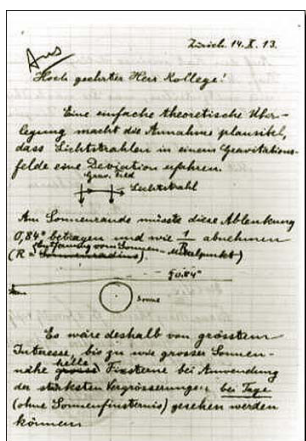
En 1911 Einstein publica un trabajo titulado *Sobre la influencia de la gravitación en la propagación de la luz*, en donde, aunque aún no hace mención explícita de la estructura del espacio-tiempo, calcula la modificación en la frecuencia de la luz causada por campos gravitacionales fuertes. En este trabajo se señalaba también que en la vecindad de objetos astrofísicos muy masivos las trayectorias de los rayos de luz se verían modificadas. En otras palabras, la luz ya no era libre e independiente de interacción gravitatoria frente a la materia; la luz “pesaba” y por consiguiente su camino se debía curvar en presencia de campos gravitacionales, de manera idéntica a como se curva la trayectoria de la Luna por la atracción de la Tierra. De acuerdo con esto, pensaba Einstein en 1911, una estrella cuya luz fuese observada luego de pasar cerca del disco del Sol debería mostrarse desplazada en un pequeño ángulo, que él calculó en unos 0,84 segundos de arco, de su ubicación normal en ausencia del Sol.<sup>6</sup>

Pero, ¿cómo observar las estrellas cuando la luminosidad del Sol las cubre completamente? Naturalmente, durante un eclipse total de Sol.

---

*sotto voce*: “Ahí va el hombre que ha escrito un libro que ni él ni nadie comprende”. ¿Será que la gravitación ha sido siempre un tema tan difícil de entender...?

6. Éste es el llamado “valor newtoniano” de la deflexión de la luz: en la medida en que la acción de la gravitación es independiente de la masa del cuerpo que sufre el campo gravitacional (los objetos caen a la Tierra con igual aceleración: recordemos la leyenda de Galileo y la torre de Pisa —más sobre esto cuando hablemos de materia oscura—), ¿por qué no habría de ejercerse este campo también sobre los corpúsculos de luz, de la misma forma en que se ejercía sobre las partículas masivas? Como lo cuenta con detalle Jean Eisenstaedt en un reciente libro sobre la relatividad general, Einstein no fue el primero en sugerir estas ideas: en 1801 el astrónomo prusiano Johann von Soldner esbozó idénticos argumentos y dedujo, basándose en la teoría de Newton, un valor exactamente igual al que Einstein llegara algo más de un siglo más tarde en forma independiente. Veremos más abajo que el cálculo correcto en el marco de la relatividad no da 0,84 sino “dos veces” este valor.



Carta de 1913 enviada por Einstein al célebre astrónomo norteamericano George Ellery Hale en donde, confiado de sus ecuaciones, trata de convencerlo a medir el efecto de la gravitación sobre la luz de las estrellas. Nótese el valor  $0,84''$  de la deflexión predicha por Einstein en 1911. Este valor erróneo será corregido en su trabajo fundamental de 1916 en donde predice una deflexión de  $1,75''$ . A esta carta, previa a la formulación final de la relatividad general, los norteamericanos no podrán responder sino una vez terminada la Primera Guerra Mundial. [Imagen cortesía The Observatories of the Carnegie Institution of Washington.]

Los trabajos anteriores a esta época habían hecho de Einstein una pequeña celebridad científica y era natural que sus resultados fueran tomados muy en serio. Luego de su predicción sobre la deflexión de los rayos solares, un colega suyo, el astrónomo Erwin Freundlich se dio manos a la obra para encontrar la situación observacional ideal para poner a prueba las predicciones de Einstein. Freundlich conocía al norteamericano Charles D. Perrine, que en esa época era director del Observatorio de Córdoba (en Argentina), y lo alentó a que planeara una expedición para intentar observar el eclipse total de sol del 10 de octubre de 1912. Este eclipse pasaría por el estado de Minas Gerais en Brasil y daría las condiciones adecuadas para medir la deflexión de la luz solar. Perrine no faltó a la cita, pero el buen tiempo no lo acompañó. Las lluvias frustraron toda esperanza de medición; un primer intento había así fracasado.

Pero los astrónomos no se dieron por vencidos fácilmente. Se organizó entonces una nueva expedición, alemana esta vez, liderada por el mismo Freundlich, con el fin de testear las predicciones de la nueva teoría durante el eclipse total del 21 de agosto de 1914. Pero esta vez hubo dos nuevos inconvenientes: el lugar y el momento, pues la zona de totalidad pasaba por la región de Crimea, al sur de Ucrania, y la expedición científica terminó siendo arrestada en territorio ruso al estallar la Primera Guerra Mundial. Al ser liberados, un mes después, el eclipse ya había pasado y por supuesto los científicos debieron regresar a casa con las manos vacías (pero sanos y salvos).

Cinco años más pasarían antes de que un nuevo intento de verificar las predicciones de Einstein viera la luz, esta vez en Inglaterra. Y la cosa no estaba exenta de una cierta cuota de ironía, pues los resultados de Einstein (un alemán), si en efecto eran verificados, mostrarían las limitaciones de la teoría de la gravitación de Newton, considerado el más grande científico inglés de todos los tiempos. Lo importante es que para los científicos de la época esta diferencia de nacionalidades nunca pasó de ser un mero detalle anecdótico; en su visión, la ciencia verdadera no tenía barreras ni banderas.

En el *interim*, Einstein había continuado sus investigaciones y publicado, en 1916, su trabajo maestro *Los fundamentos de la teoría general de la relatividad*, en el cual, luego de un verdadero *tour de force* matemático para el lector no iniciado (como lo había sido para él mismo, al tener que aprender las nuevas matemáticas necesarias para llevarlo a cabo), Einstein presenta el formalismo que describe al campo gravitacional en su forma final. En éste, la fuerza gravitacional de Newton, presente en un espacio absoluto e inerte, es sustituida

por la geometría de un espacio-tiempo dinámico. Sus nuevas ecuaciones relacionan en una forma precisa la geometría de este espacio-tiempo (y en particular su curvatura) con su contenido material y energético. Las ecuaciones de la relatividad general tienen un poder de síntesis y una belleza matemática pocas veces encontrados en la ciencia, y que expresan formalmente la gran novedad de la teoría de Einstein: el espacio-tiempo “actúa” sobre la materia y le indica a ésta cómo debe desplazarse; por su parte, la materia actuará también sobre el espacio-tiempo, y le indicará cómo este último se deberá curvar.

A partir de este momento, entonces, la geometría no se limitará ya más a determinar sólo trayectorias de cuerpos (o de la luz) en el sentido en que estábamos acostumbrados antes de la relatividad general, esto es, en un espacio tridimensional; con la nueva teoría de Einstein, la geometría determinará las “trayectorias” en el espacio-tiempo: el “camino” seguido por las partículas en un “espacio” de cuatro dimensiones que llamamos su *línea de universo*.<sup>7</sup> Si un cuerpo no se desplaza en el espacio, su trayectoria espacial será nula; no así su trayectoria espacio-temporal, ya que aunque no viaje en el espacio, siempre viajará en el tiempo, y por ello su línea de universo tendrá una cierta “longitud”. Las líneas de universo correspondientes a aquellos cuerpos “en caída libre” (la Luna alrededor de la Tierra, por ejemplo), esto es, no sometidos a fuerzas externas, corresponden a las “rectas” de la geometría del espacio-tiempo, que son determinadas por la distribución local de masas (en el caso de la Luna, por la Tierra): a estas “rectas” las llamamos *geodésicas*. (La fuerza de Newton ya no existe más en relatividad general. La Tierra curva el espacio a su alrededor y la Luna sólo sigue su trayectoria natural, libre de fuerzas: en una palabra, una geodésica en el espacio curvo de la Tierra.)

Entre las primeras aplicaciones de su nueva formulación, y como lo había hecho ya en 1911, Einstein calcula la deflexión de la luz de las estrellas al pasar cerca del Sol (efecto que hoy llamamos de *lente gravitacional*). Al así hacerlo encuentra que el ángulo de deflexión que antes había estimado en aproximadamente 0,84” ya no valía eso, sino unas dos veces ese valor, para ser precisos, 1,75”. Vemos ahora, en retrospectiva, que quizás hasta fue beneficioso que las expediciones argentina y alemana fracasaran... Este último valor era el que los astrónomos deberían tratar de detectar para determinar si la teoría de la relatividad general de Einstein era correcta o no.

7. La “línea de universo” del autor puede verse en el sitio web que figura al final del libro.

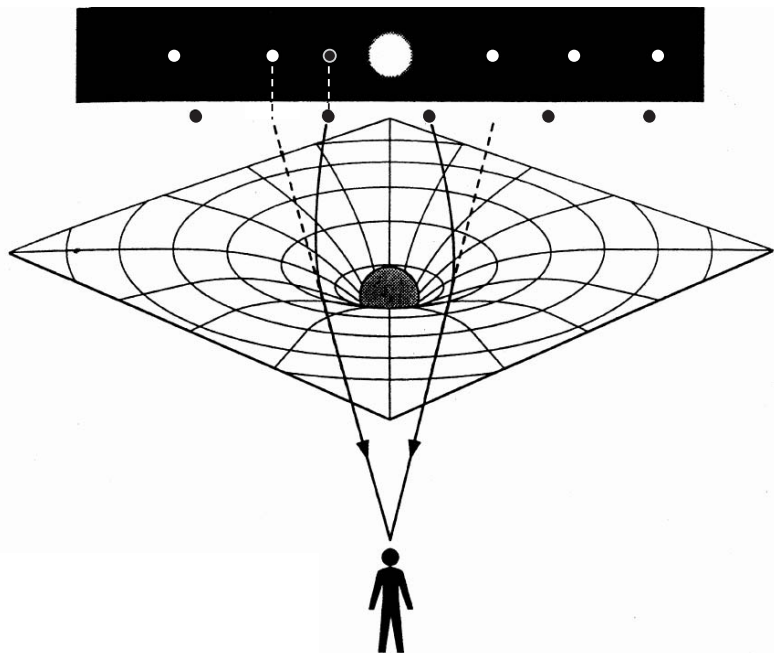
## A LA CAZA DE UN ECLIPSE

*“El resultado del movimiento del perihelio de Mercurio me da una gran satisfacción. Cuánto nos es útil la precisión pedantesca de la astronomía, de la cual yo en mi fuero íntimo me he burlado tantas veces.”*

Einstein, carta al físico Sommerfeld

En 1917, el Astrónomo Real de Inglaterra, Frank Watson Dyson, quien tenía ya sobrada experiencia en viajes científicos a la “caza de eclipses”, sugiere que se organice una expedición para estudiar el eclipse total de 1919. Varias personalidades apoyaron la iniciativa y entonces, con el fin de aumentar las chances de éxito, se organizaron dos expediciones: una viajó a Sobral, en el estado de Ceará, al Norte del Brasil, y fue liderada por los astrónomos Andrew Crommelin y Charles Davidson; la otra viajó a la isla Príncipe, en África occidental, frente a la costa de la Guinea Española, y fue encabezada por Edwin Cottingham y Arthur Eddington. Este último, como veremos, volverá a aparecer en nuestra historia, ya que Eddington fue uno de los primeros científicos que llegó no sólo a comprender la teoría de la relatividad sino además a apreciar su relevancia y alcance. Fue él también quien contribuyera al desarrollo y publicidad de los trabajos del belga Georges Lemaître, uno de los padres del Big Bang.

Esquema simplificado de la forma en que el Sol curva el espacio a su alrededor. Los rayos de luz de las estrellas que se hallan detrás del Sol sufren una desviación al pasar cerca del limbo del astro que hace que su posición aparente (círculos blancos) sea distinta de la real (círculos negros). El eclipse total de Sol del 29 de mayo de 1919, llamado “el eclipse de Einstein”, fue la gran ocasión de verificar una de las predicciones más importantes de la teoría de la relatividad general: la deflexión de la luz en un campo gravitacional. Hoy este efecto es más conocido bajo el nombre de efecto de “lente gravitacional” y su uso en astrofísica permite estimar con gran exactitud la distribución de materia presente en el universo, y que curva la trayectoria de los rayos de luz. Enfatizamos este punto un poco más, pues lo merece: con este método se logra estimar –en el deflector– aun la distribución de ese tipo de materia (oscura) que no emite luz y que resulta entonces invisible a nuestros telescopios.



Llegado el momento tan esperado del eclipse, las dos misiones tomaron fotografías de la silueta del Sol contra el cúmulo de estrellas de la Hyades, que en esos breves instantes de totalidad estaban ubicadas en la misma dirección que el astro. Las imágenes fueron luego comparadas con fotografías de archivo de esa región del cielo en ausencia del Sol para detectar posibles diferencias. El resultado fue el esperado: las estrellas estudiadas estaban en efecto desplazadas del centro del disco solar en aproximadamente la cantidad predicha por la teoría de la relatividad. El grupo de Sobral había detectado un desplazamiento de 1,9" (segundos de arco) mientras que el grupo de Eddington encontraba 1,6", este último con una incertidumbre experimental de unos 0,3". ¡Una primera gran prueba y la teoría de la relatividad de Einstein había salido exitosa! En los años que siguieron, pruebas similares se volvieron a realizar una multitud de veces y hasta el presente el acuerdo entre la observación y la teoría no ha hecho más que mejorar.

El anuncio de los resultados en Inglaterra merecía un evento especial y se convocó entonces a un congreso conjunto de las prestigiosas Royal Society y Royal Astronomical Society en Londres para el 6 de noviembre de 1919. Recordemos que Isaac Newton había sido uno de los más prestigiosos miembros de la primera sociedad científica. Podemos entonces imaginar el rígido ambiente de la reunión, en la que un grupo de los astrónomos venía a presentar pruebas fehacientes de que una nueva teoría debía reemplazar la vieja mecánica newtoniana que había reinado por más de dos siglos.

El matemático y filósofo inglés Alfred N. Whitehead estaba presente en la ocasión y la describe así:

“La atmósfera de tenso interés era exactamente la misma que en el drama griego. Éramos el coro que comentaba sobre la sentencia del destino revelada en el desarrollo de un incidente supremo. Había un aire dramático en cada etapa de la ceremonia tradicional, y en el fondo el cuadro de Newton para recordarnos que la más grande de las generalizaciones científicas estaba ahora, luego de más de dos siglos, a punto de recibir su primera modificación. [...] Una gran aventura del pensamiento había finalmente llegado a buen puerto.”

La relatividad general será a partir de ese momento el marco teórico más preciso y elegante para describir el universo, y formará la sólida base sobre la cual se edificarán los modelos del Big Bang.

## REVOLUTION IN SCIENCE.

### NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

#### NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN.

Yesterday afternoon in the rooms of the Royal Society, at a joint session of the Royal and Astronomical Societies, the results obtained by British observers of the total solar eclipse of May 29 were discussed.

The greatest possible interest had been aroused in scientific circles by the hope that rival theories of a fundamental physical problem would be put to the test, and there was a very large attendance of astronomers and physicists. It was generally accepted that the observations were decisive in the verifying of the prediction of the famous physicist, Einstein, stated by the President of the Royal Society as being the most remarkable scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was difference of opinion as to whether science had to face merely a new and unexplained fact, or to reckon with a theory that would completely revolutionize the accepted fundamentals of physics.

“Revolución en la Ciencia” - “Nueva teoría del universo” - “Derrocadas las ideas de Newton”; así rezaba un artículo aparecido en el diario londinense *The Times* el 7 de noviembre de 1919, luego de la reunión conjunta de las dos mayores sociedades científicas inglesas.