



La población de la localidad de Sobral, en el estado de Ceará, reunida en la Praça do Patrocínio antes del inicio del fenómeno



Ningún eclipse solar tuvo tantas repercusiones en la historia de la ciencia como el del 29 de mayo de 1919, fotografiado y analizado al mismo tiempo por dos equipos de astrónomos británicos. Uno de ellos fue enviado a la ciudad de Sobral, en el interior del estado brasileño de Ceará; el otro, a la isla Príncipe Eduardo, por aquel entonces un territorio portugués en la costa de África Occidental. El objetivo era verificar si la trayectoria de la luz estelar se desviaría al pasar por una región con un fuerte campo gravitacional, en este caso alrededor del Sol, y cuál sería el tamaño de esta alteración en caso de que pudiera medirse tal fenómeno. Salvo algún imprevisto, las expediciones trabajaban con tres posibles resultados: que la luz no cambiaría su trayectoria a causa de la gravedad, que el

desvío efectivamente ocurriría, según cálculos realizados por otros físicos a partir de la teoría de la gravitación universal del británico Isaac Newton (1643-1727), y que ese desvío se daría de acuerdo a las predicciones del físico alemán Albert Einstein (1879-1955) en la teoría general de la relatividad, un valor de aproximadamente el doble que el que obtuvieron los seguidores de Newton. Seis meses después, las fotos y los cálculos publicados por los británicos sobre el fenómeno le dieron la razón a Einstein.

Esta empresa es considerada como la primera prueba experimental de la teoría de la relatividad general, publicada cuatro años antes por Einstein, según la cual la materia y la energía distorsionan la malla del espacio-tiempo y, en consecuencia, la trayectoria de la luz que viaja a través de la misma. Al com-

Cuando la luz se curvó

La observación del eclipse solar de 1919 en Brasil y en África suministró la primera prueba experimental de la validez de la teoría de la relatividad de Albert Einstein

Marcos Pivetta y Rodrigo de Oliveira Andrade

PUBLICADO EN ABRIL DE 2019



probarse las ideas del espacio-tiempo curvo de Einstein, los resultados de las observaciones del eclipse cambiaron la concepción que se tenía sobre el Universo. Tal corroboración también contribuyó para reconocer al físico alemán como uno de los científicos más respetados y conocidos del siglo XX.

Después de haber pasado 100 años desde aquel eclipse, es consenso dentro de la comunidad científica que la relatividad general predice con mayor precisión el cambio de trayectoria (deflexión) de la luz de las estrellas que los cálculos realizados a partir de la teoría de la gravedad newtoniana. Sin embargo, durante décadas, los astrofísicos, físicos e historiadores de la ciencia debatieron si los datos obtenidos en las observaciones de 1919 eran lo suficientemente sólidos como para respaldar las ideas de Einstein tal como efectivamente sucedió. Algunos

críticos argumentaron que las mediciones no habrían sido lo suficientemente precisas como para decidir cuál de las dos teorías estaba correcta; otros sostuvieron que el astrónomo británico Arthur Stanley Eddington (1882–1944), director del Observatorio de la Universidad de Cambridge en el Reino Unido y jefe de la expedición enviada para observar el eclipse en la isla Príncipe Eduardo, habría descartado deliberadamente datos favorables a la teoría de Newton producidos en Sobral. “Eddington era un entusiasta de las ideas de Einstein y estaba ansioso por generar un gesto que reconciliase al Reino Unido con Alemania, dentro del contexto de final de la Primera Guerra Mundial (1914-1918), a través de la verificación experimental de su teoría”, afirma el físico Luiz Nunes de Oliveira, del Instituto de Física de São Carlos, Universidad de São Paulo (IFSC-USP).

En el rastro de las estrellas

Durante las primeras décadas del siglo XX, varios astrónomos trataron de captar la deflexión de la luz, casi todos sin éxito



1911

El astrónomo alemán Erwin Finlay-Freundlich intentó medir la deflexión de la luz con placas fotográficas de un eclipse solar obtenidas en el **Observatorio Lick**, en Estados Unidos



1912

Científicos del Observatorio Argentino dirigido por **Charles Perrine** planearon registrar un eclipse solar en Serra da Mantiqueira, en Minas Gerais, Brasil, pero, debido al mal tiempo, nada pudo fotografiarse



1914

El comienzo de la **Primera Guerra Mundial** volvió a frustrar los planes de Finlay-Freundlich de registrar un eclipse en Crimea, Rusia

1916

El Observatorio Argentino pudo registrar un eclipse solar en Tucacas, Venezuela, pero ninguna de las fotografías sirvió para probar las ideas de Einstein

“Sin embargo, no existen evidencias de que haya existido una manipulación de los datos.”

El astrofísico e historiador de la ciencia irlandés Daniel Kennefick, de la Universidad de Arkansas en Estados Unidos, también refuta las acusaciones de que Eddington habría forzado los datos a favor de Einstein. “Además de no haber estado en Sobral y, por ende, no haber participado en la producción de los registros, Eddington tampoco participó en el análisis de los datos de esta expedición, lo que fue realizado por Frank Dyson (1868-1939) y sus

subordinados en el Observatorio de Greenwich, Londres”, argumenta Kennefick, quien está publicando un libro sobre los 100 años del eclipse (*lea la entrevista en la página 11*).

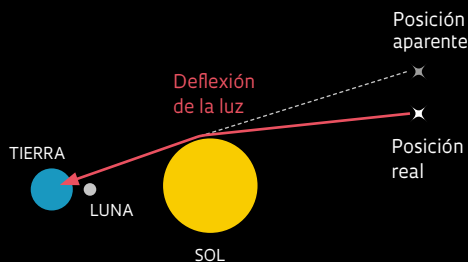
Una región del cielo con estrellas, a la que los astrónomos denominan “campo estelar”, cambia continuamente de posición. Pero la posición relativa entre sus estrellas es siempre la misma en una escala pequeña de tiempo, generalmente de meses. “Si tomamos una foto hoy y otra dentro de tres meses, las estrellas del mismo campo se su-

¿POR QUÉ LA LUZ CAMBIA DE TRAYECTORIA?

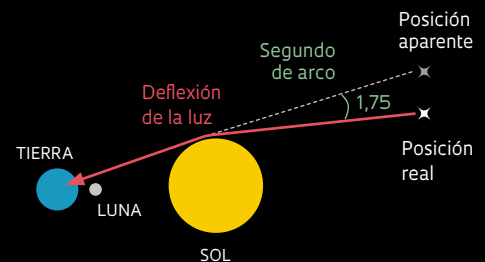
NOCHE



ECLIPSE



LA MEDICIÓN



La luz de una estrella viaja en línea recta por el Universo hasta que llega a la Tierra, de modo tal que su posición al fotografiársela a la noche coincide con su ubicación real

Durante el eclipse, la trayectoria de la luz de la estrella es objeto de una deflexión al pasar cerca del Sol, cuya masa curva la malla del espacio-tiempo a su alrededor, de acuerdo con la relatividad general. La luz cambia de dirección al pasar por esta zona

De acuerdo con los cálculos de Einstein, el ángulo de deflexión de la luz es de 1,75 segundos de arco, más o menos el doble de lo que había sido previsto por otros físicos con base en la teoría gravitacional de Newton



1918

El equipo del Observatorio Lick no pudo fotografiar el eclipse de Sol en Estados Unidos porque sus equipos habían quedado retenidos en Rusia desde 1914

1919

El eclipse que confirmó la idea de Einstein cruzó la línea ecuatorial. Fue observado en Sobral, Brasil, y en la isla Príncipe Eduardo, África

1922

Las fotografías de un eclipse solar, tomadas en la Isla de Navidad, reforzaron los datos obtenidos años atrás en Sobral

FUENTE EARMAN, J. & GLYMOUR, C. RELATIVITY AND ECLIPSES: THE BRITISH ECLIPSE EXPEDITIONS OF 1919 AND THEIR PREDECESSOR

perponen perfectamente”, explica el astrónomo Augusto Damineli, de la USP. “Pero en el caso de un eclipse solar, la luz de las estrellas aparece ligeramente desplazada con relación a la foto del mismo campo tomada de noche sin la presencia del Sol. Cuanto más cerca del Sol se encuentra una estrella, mayor será la curvatura de la trayectoria de su luz durante el eclipse”. Ese era el efecto, por aquel entonces previsto, pero aún no observado experimentalmente, que las expediciones británicas lograron confirmar.

En el libro *Opticks*, cuya primera edición es de 1704, Newton afirmaba que la trayectoria de la luz debía ser torcida por la gravedad, pero no calculó de cuánto sería esta desviación. Para él, la gravedad era una fuerza que actuaba entre la materia de forma proporcional a la masa de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. En aquella época, la naturaleza de la luz se desconocía. Coexistían dos hipótesis: que la luz estaba constituida por corpúsculos (partículas) o que era un tipo de onda. Partiendo de la premisa de que la luz era corpuscular, incluso sin conocer su masa, el británico John Michell (1724-1793) y el francés Pierre-Simon Laplace (1749-1827) calcularon, en forma independiente, los efectos de la gravedad sobre la luz a finales del siglo XVIII. A lo largo del siglo XIX se estableció que la luz era una onda de naturaleza electromagnética. “Después de que se consideró que la luz era un tipo de onda, se volvió completamente incierto si podía sufrir algún efecto de la gravedad, pues, en tal caso, no sería materia”, comenta Daniel Vanzella, del Instituto de Física de São Carlos (IFSC) de la USP. “Esta pregunta quedó sin respuesta durante más de 100 años”.

Einstein comenzó a ser conocido dentro de la comunidad científica al introducir en el año 1905

una nueva visión con relación a la noción de espacio y tiempo. “Con la publicación de la llamada teoría de la relatividad especial, el espacio y el tiempo dejaron de entenderse como absolutos”, explica el astrónomo Reinaldo Ramos de Carvalho, del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Inpe, por sus siglas en portugués), en São José dos Campos, estado de São Paulo. Según el físico alemán, el espacio podía deformarse, encogerse y colapsar, formando agujeros negros, mientras que el tiempo podía dilatarse. Sin embargo, esta versión incompleta de su teoría todavía daba el mismo resultado que la gravitación newtoniana para la cuestión de la desviación de la luz: 0,87 segundos de arco. Solamente después de publicar la teoría de la relatividad general, en 1915, Einstein logró dar un paso más.

Introdujo la idea de que la gravedad no era una fuerza intercambiada entre la materia, tal como decía Newton, sino una especie de efecto colateral de una propiedad de la energía: la de deformar el espacio-tiempo y todo lo que se propaga sobre él, incluyendo ondas, tal como la luz. “Para Newton, el espacio era plano. Para Einstein, con la relatividad general, se curvaba al encontrarse cerca de cuerpos con gran cantidad de energía o de masa”, comenta el físico George Matsas, del Instituto de Física Teórica de la Universidade Estadual Paulista (IFT-UNESP). Con el espacio-tiempo curvo, el valor de deflexión de la luz calculado por Einstein prácticamente se duplicó, llegando a 1,75 segundos de arco.

SOBRAL EN EL MAPA DEL MUNDO

Después de la publicación de la relatividad general, astrónomos de diferentes países se comprometieron a tratar de detectar este fenómeno mediante la observación de eclipses solares totales. Era posible fotografiar estrellas cercanas a la corona solar y, por ende, comprobar si su luz había cambiado de posición debido a la cercanía de la gran estrella. Sin embargo, ya sea por el mal tiempo o por las dificultades impuestas por la Primera Guerra Mundial, nadie logró obtener resultados que comprobaran las ideas de Einstein hasta el eclipse de 1919 (*lea la cronología en la página 20*).

A mediados de 1918, científicos brasileños del Observatorio Nacional, con sede en Río de Janeiro, a sabiendas de que habría un eclipse al año siguiente, descubrieron que la tranquila ciudad de Sobral, situada a 200 kilómetros de Fortaleza, en el nordeste de Brasil, reunía condiciones geográficas bastante favorables para la observación del fenómeno. Con esto en mente, el astrónomo Henrique Charles Morize (1860-1930), director de la institución, elaboró un informe detallado sobre la región y se lo envió a diversas instituciones científicas del mundo, incluida la Real Sociedad Astronómica de Londres.



El telescopio de 13 pulgadas utilizado por los británicos en el estado brasileño de Ceará para registrar el eclipse

Frank Dyson, presidente de la Real Sociedad Astronómica, había conocido las teorías de Einstein a través de Arthur Eddington, secretario general de la institución. Por ese entonces Eddington ocupaba un lugar destacado dentro de la comunidad astronómica europea, según afirma el historiador de la ciencia Matthew Stanley, del Departamento de Historia de la Ciencia de la Universidad Harvard, en Estados Unidos. “Su trabajo en cosmología estadística le había ayudado a establecer una reputación como científico creativo y talentoso, y a su trabajo con las estructuras estelares aún en los días actuales se lo considera fundamental para el desarrollo de la astrofísica teórica”, escribió Stanley en un artículo publicado en la revista *Isis* en 2003. “Tanto Eddington como Dyson sabían que el eclipse de mayo de 1919 sería especial”, comenta Nunes de Oliveira. “El Sol pasaría frente a un gran cúmulo estelar situado en la constelación de Tauro y habría muchas luces brillantes para observar”. El eclipse iba a permitir que fuesen fotografiadas durante algunos minutos las estrellas del fondo del cielo cercanas al borde del sol, a una distancia de 150 años luz de la Tierra. Cada año luz equivale a 9,5 billones de kilómetros.

CON LA MIRADA DIRIGIDA AL CIELO

Para verificar cuál teoría estaba correcta, si la de Newton o la de Einstein, la Real Sociedad Astronómica organizó las expediciones a regiones donde el fenómeno podía observarse mejor. Eddington lideró la ida a la isla Príncipe Eduardo, a 300 kilómetros de la costa de África. El otro equipo, formado por dos miembros del Observatorio de Greenwich, Charles Davidson y Andrew Crommelin, coordinado por Dyson a distancia, se dirigió a Sobral.

El equipo de Greenwich llegó a Brasil el 23 de marzo de 1919. Desembarcaron en el puerto de

Pese a las polémicas, las conclusiones de Eddington y Dyson estaban correctas, tal como se lo comprobó en las décadas siguientes

Belém, en el estado norteno de Pará, donde permanecieron durante algunas semanas, mientras Henrique Morize, del Observatorio Nacional, terminaba los preparativos para la llegada de los británicos a Sobral. Por cortesía del gobierno brasileño, todos los equipos de investigación pasaron por la aduana sin ser inspeccionados, según relataron los investigadores británicos en un artículo publicado más tarde en la revista *Philosophical Transactions of the Royal Society*.

Davidson y Crommelin llegaron con dos telescopios refractantes, ambos acoplados a arreglos de espejos llamados celostatos, ensamblados para acompañar al Sol en su movimiento diario y proyectar su imagen de vuelta al equipo. El telescopio principal había sido retirado del Observatorio de Greenwich. Tenía un campo de visión muy amplio, lo cual, en teoría, iba a permitir que se fotografiasen más estrellas cercanas al Sol durante el

eclipse. Su apertura era de 13 pulgadas, montada en un celostato de 16 pulgadas. El más pequeño era una especie de equipo de reserva. Tenía una apertura de 4 pulgadas y estaba acoplado a un celostato de 8 pulgadas. El astrónomo jesuita británico Aloysius Cortie (1859-1925) prestó ese aparato.

Los científicos llegaron a Sobral el 30 de abril de 1919 y fueron recibidos por el alcalde de la ciudad, Jácome de Oliveira. “Entonces conocieron al coronel Vicente Saboya, quien había cedido una de sus casas para recibir a los visitantes extranjeros”, dice el físico Emerson Ferreira de Almeida, de la Universidad Estadual Vale do Acaraú, en Sobral. “Las observaciones se realizarían en el Jockey Club de la ciudad”. Otras dos expediciones con equipos más modestos, una brasileña y otra

estadounidense, se unieron a los astrónomos ingleses días después, en Sobral. Sin embargo, sus mediciones no tenían como objetivo verificar la validez de la teoría de la relatividad y no se utilizaron para comprobar las ideas de Einstein (véase el reportaje de página 10).

Del otro lado del Atlántico, Eddington y su equipo habían desembarcado en el puerto de San Antonio, en la isla Príncipe Eduardo, el 23 de abril de 1919. En el equipaje llevaban un telescopio que les había prestado el Observatorio de Cambridge, similar al más grande que fue enviado a Sobral. Pero el clima en la isla no estaba muy favorable. El cielo nublado perjudicó la calidad de las imáge-

nes tomadas. En algunas, las estrellas aparecieron más claras, en otras, desaparecieron en medio del cielo nublado. “El día también amaneció nublado en Sobral”, dice el astrónomo Carlos Veiga, de la Coordinación de Astronomía y Astrofísica del Observatorio Nacional. “Pero paulatinamente las nubes se fueron disipando y un destello de luz se abrió”. Un poco antes de las 9 de la mañana, en la ciudad de Ceará, la Luna comenzó a superponerse al Sol, cubriéndolo por completo minutos más tarde. El eclipse duró 5 minutos y 13 segundos.

El equipo de Greenwich permaneció en Sobral hasta julio de ese año para fotografiar el mismo campo estelar por la noche, sin la influencia gravitacional del Sol. Eddington, quien se encontraba en la isla Príncipe Eduardo, volvió a Inglaterra antes de que el equipo de Sobral hiciera lo propio, y produjo imágenes del mismo campo estelar, pero en el cielo de Oxford. Lo ideal habría sido que las imágenes de comparación se tomaran desde el mismo lugar de observación del eclipse.

RESULTADOS DIVERGENTES

Los astrónomos produjeron tres conjuntos de placas fotográficas para medir la desviación de la luz de las estrellas cercanas a la corona del Sol. En Sobral, el telescopio principal registró doce estrellas y el telescopio auxiliar, siete. El equipo enviado a la isla Príncipe Eduardo captó cinco estrellas. Los tres lograron medir un cierto nivel de desviación de la luz de las estrellas durante el eclipse, confirmando la idea que sostenían Newton y Einstein. Pero los resultados de cada equipo fueron diferentes, con márgenes de error también distintos. Dos de ellos favorecieron los cálculos de Einstein mientras que el otro se acercaba más a las ideas de Newton.

Los cálculos más fiables se obtuvieron con base en las imágenes más nítidas capturadas del eclipse, captadas irónicamente con el telescopio más pequeño enviado a Sobral. El análisis de sus placas fotográficas, realizado después de que el equipo regresó al Reino Unido, indicó una deflexión de la luz de 1,98 segundos de arco (con 0,12 segundo de arco de error), más de lo que Einstein había calculado. Todas las imágenes producidas por el telescopio más grande utilizado en la ciudad de Ceará estaban borrosas o desenfocadas. “Esto posiblemente ocurrió porque el Sol calentó la dis-

posición de los espejos, desregulándolos”, sugiere el físico Ramachrisna Teixeira, de la USP. A partir del análisis de este material, reconocidamente de calidad inferior, el equipo de Sobral encontró una manera de medir la desviación de la luz y llegó a una deflexión de 0,87 segundos de arco en la trayectoria de la luz de las estrellas fotografiadas. El valor calculado se alineaba con las proyecciones basadas en la teoría gravitacional de Newton. Sin embargo, debido a la precariedad de las imágenes, el valor de la deflexión obtenido en los registros del telescopio más grande quedó descartado en el análisis final de los británicos.

En la isla Príncipe Eduardo, debido al mal tiempo, las imágenes de muchas estrellas quedaron inmersas en el halo difuso causado por la luz solar o cubiertas por la Luna. La turbulencia atmosférica afectó aún más la calidad de las fotografías. Pese a las adversidades, Eddington logró analizarlas y compararlas con las fotos del mismo campo estelar obtenidas por él mismo más tarde, en Oxford. El resultado fue una deflexión de 1,61 segundos de arco, con un margen de error de 0,30 segundo de arco, un valor ligeramente inferior al previsto por Einstein. “El mayor valor debe asignarse a los datos obtenidos con la lente de 4 pulgadas en Sobral. Con base en la superioridad de sus imágenes y de la mayor escala de fotografías, se reconoció que estos [resultados] se mostraron mucho más confiables”, afirmaron Dyson, Eddington y Davidson en un texto comunicado el 6 de noviembre de 1919, en el cual se anunció una conclusión favorable a las predicciones de Einstein durante la reunión de la Real Sociedad de Astronomía, en Londres.

Pese a las polémicas que surgieron más tarde, las conclusiones de Dyson y Eddington resultaron estar en lo cierto. Varios eclipses se observaron durante las décadas siguientes y las mediciones siempre apuntaron hacia una deflexión cercana a la calculada por Einstein. La confirmación de su teoría ayudó a expandir las perspectivas de investigaciones en el campo de la física, la astronomía y la cosmología. “Las ideas del físico alemán fueron muy bien interpretadas por el físico soviético Alexander Friedmann [1888-1925] quien, apoyándose en Einstein, declaró que las galaxias estaban alejándose de la Tierra porque el espacio-tiempo, es decir, el universo, estaba en expansión”, resalta Ramos de Carvalho.

La relatividad general también allanó el camino hacia la difusión de conceptos importantes para la astrofísica, como el de la existencia de agujeros negros (regiones del espacio-tiempo extremadamente compactas, donde la gravedad es tan fuerte que ni la luz escapa) y el de las ondas gravitacionales, perturbaciones en la curvatura del espacio-tiempo que se propagan como ondas. Este último fenómeno se confirmó recién a principios del 2016. ■

Placas fotográficas generadas por el equipo brasileño en observaciones espectroscópicas de la corona solar

