



SOCIEDAD / CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DIVULGACIÓN **CIENTÍFICA. Un siglo de** **relatividad general**

Si la ecuación $E = mc^2$ es una icónica representante de la teoría de la relatividad especial, la de la presentación de esta nota podría serlo de la teoría que la extiende: la de la relatividad general. Mucho menos popular pero profundamente significativa como la primera, describe una correspondencia mutua entre el espacio (mejor dicho el espacio-tiempo) y la materia contenida en este. La relatividad general es una teoría de la gravedad que reformuló radicalmente la concepción newtoniana de la gravitación universal y es una “piedra de toque” para la física y la cosmología que viene desarrollándose desde el siglo XX.

Gabriel Paissan

Físico | CNEA y CONICET | Docente CRUB - UNCo

Sábado 20 de febrero de 2016



INICIO



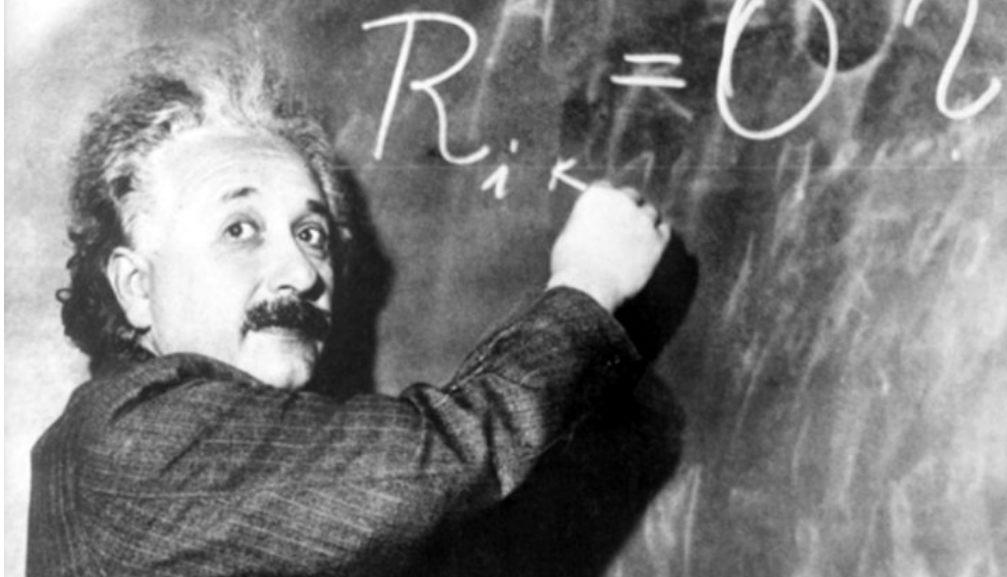
SECCIONES



COMUNIDAD



INTERNACIONAL



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$$

A partir de que Newton sentado a la sombra de un manzano se inspirara con la caída de uno de sus frutos, la humanidad sabe que la razón por la que no salimos despedidos de la redondez de la Tierra, o la de porqué una piedra, pelota o cualquier otro objeto cae verticalmente al suelo cuando lo soltamos, se debe a un hecho –a una ley física en realidad– que expresamos diciendo “todos los cuerpos son atraídos por la gravedad de la Tierra”. Más precisamente, la ley de gravitación universal de Newton publicada en 1687, expresa que la fuerza de atracción entre dos objetos es directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación de esos objetos. Esto es, cuanto más masivos sean uno o ambos objetos y/o

misteriosa, tuvo un éxito rutilante al explicar el movimiento orbital de los planetas y el de otros cuerpos celestes del sistema solar como los cometas, satélites, etc. Develó también el fenómeno de las mareas, y junto a los aportes a la mecánica y las nociones de espacio y tiempo absolutos legó a la humanidad toda una concepción del universo. Las ideas de Einstein cambiarían completamente esas concepciones. En el origen de la relatividad general anidan los encantos de los “experimentos pensados” con los que Einstein bosquejó su [relatividad especial](#)(1) y revolucionó al mundo en 1905. Ocurrió dos años después, mientras Einstein estaba preparando un artículo-reseña de su teoría para un anuario científico. Hasta ese momento el principio de relatividad era aplicado a “objetos” (sistemas de referencia) no acelerados. ¿Era posible extender la relatividad especial a sistemas que están acelerados unos con respecto a otros? Einstein encontró una respuesta a ésta pregunta a través de su búsqueda de incluir la gravedad en su teoría. En sus propias palabras “...*me di cuenta de que todos los fenómenos podían ser analizados mediante la relatividad especial salvo la ley de gravitación...*”. Fue entonces en 1907 –aún fuera de la Academia, sentado en su trabajo en la oficina de patentes de Berna- que le asaltó un pensamiento: “*si una persona está en caída libre, no siente su propio peso*”. La idea lo llevaría durante los siguientes ocho años a la generalización de la relatividad y concebir una teoría de la gravitación: la manera en que la gravitación de Newton tenía que ser modificada para que sus leyes se adecuaran a la relatividad especial.

Y aquí viene uno de sus “experimentos pensados”. Imagínese una persona de pie dentro de una cabina cerrada como la de un ascensor flotando en las profundidades del espacio, lejos de cualquier planeta, estrella u otros cuerpos masivos. La



INICIO



SECCIONES



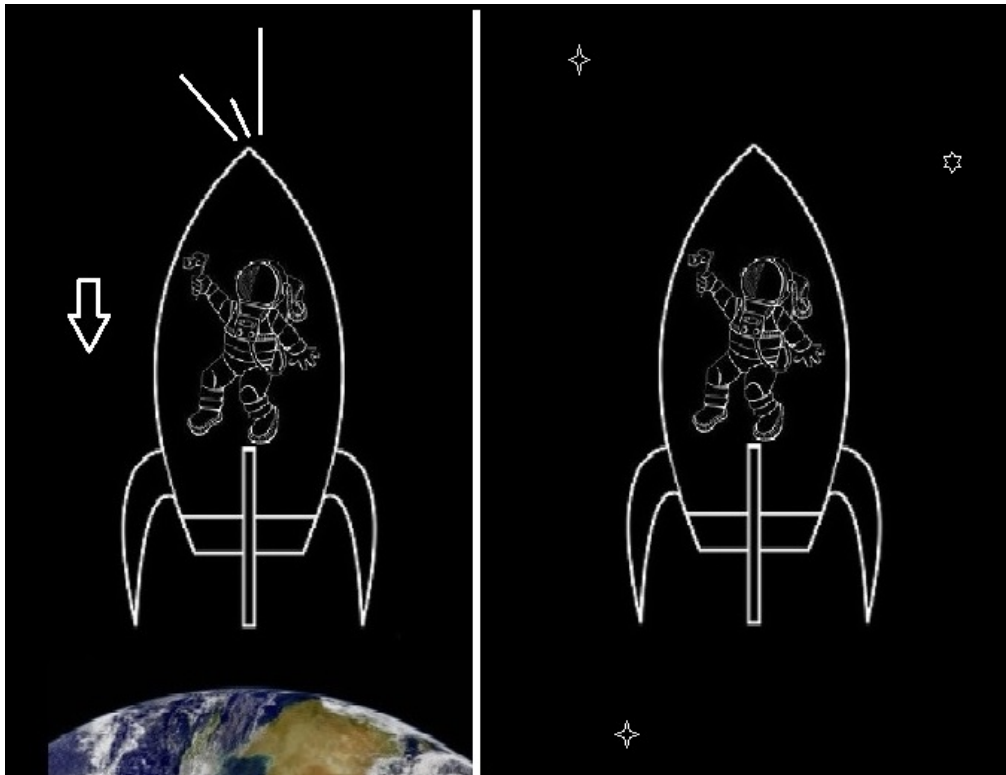
COMUNIDAD



INTERNACIONAL

que la que experimentaría otra que estuviera en caída libre inmersa en un campo gravitatorio (en la primera figura puede verse una representación que esquematiza el experimento pensado de Einstein con cohetes en lugar de ascensores). Si luego se enganchara una soga en el techo de la cabina y se jalara hacia arriba con una fuerza constante, la cabina comenzaría a ascender con una aceleración uniforme. La persona que está adentro sentirá sobre sus pies la misma sensación que tiene al pisar cualquier lugar sobre tierra firme (véase la segunda figura). El quid de la cuestión es que si pensamos que la cabina o ascensor no tiene ventanas, la persona que está dentro no podrá distinguir si el ascensor está quieto dentro de un campo gravitatorio, o si por el contrario está siendo jalado con aceleración constante en el espacio vacío, libre de gravedad.

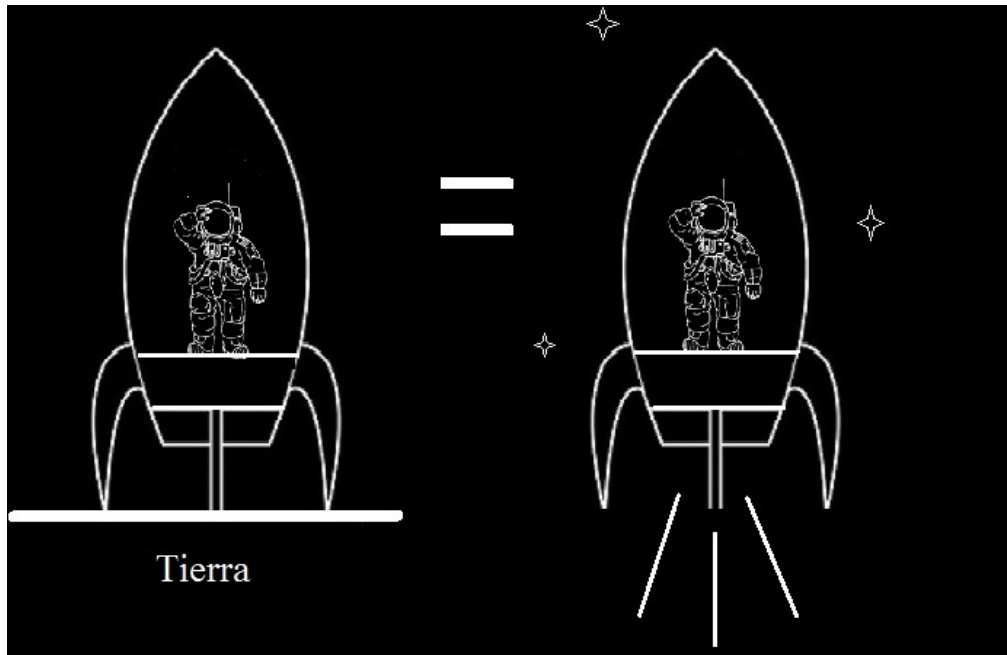
El experimento mental puede parecer inocente, pero las conjeturas que pueden desprenderse de este no lo son. Significa que las leyes de la física tienen que ser idénticas en ambas situaciones.



En acuerdo con la física de Newton, aprendemos en el secundario, que cuando pesamos un objeto medimos la intensidad de la fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre la masa de ese objeto. Esa masa se define como “masa gravitatoria o pesante”. Pero ese objeto posee además lo que se denomina “masa inercial”, que define la fuerza hay que aplicarle a esa masa para que adquiera una aceleración dada. Como cuando es necesario empujar un auto para darle arranque. La fuerza que tendremos que aplicar dependerá del tamaño (y por ende de la masa...inercial) del auto. Un hecho notable es que la masa inercial de un objeto es igual a su masa gravitatoria -como bien registró Newton. Sin embargo, no dejó una interpretación de esa equivalencia, que resultaba bastante misteriosa como en el hecho de la interacción a distancia de la atracción gravitatoria.

Volviendo al experimento pensado en que una cabina con una persona dentro es jalada con una aceleración constante lejos de cualquier campo gravitatorio, podemos inferir que la fuerza que siente sobre sus pies se deberá a su masa inercial. En cambio, si la cabina estuviera en reposo sobre la superficie terrestre, la fuerza que sentirá la persona se deberá a su masa pesante o gravitatoria. En acuerdo con lo antes dicho, la masa inerte equivale – siempre- a la masa gravitatoria. De esta correspondencia, Einstein concluyó, que: *resulta imposible descubrir mediante un experimento si las observaciones en un sistema se deben a que está acelerado, o bajo un campo gravitatorio*. Lo denominó “principio de equivalencia”, y se enuncia diciendo que: *los efectos locales de la gravedad y de la aceleración (en ausencia de la gravedad) son equivalentes*.

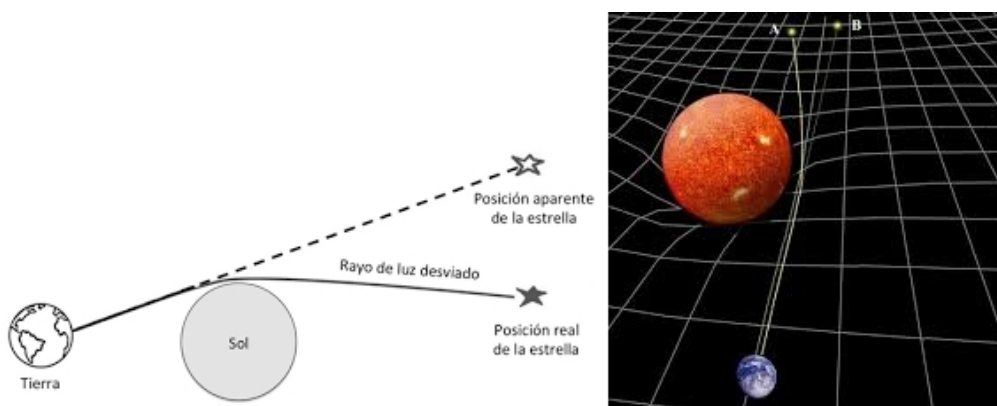




El principio de equivalencia, traducido en ecuaciones matemáticas, se convirtió en la base de la relatividad general. Einstein mostró que si sus ideas eran correctas, un rayo de luz que estuviera ya sea dentro de un sistema en movimiento acelerado o sujeto a un campo gravitatorio debería... ¡curvarse! y el tiempo transcurrir más lentamente. Por ejemplo, en el caso del ascensor, supongamos que prendemos un puntero láser apuntando a una pared mientras la cabina es jalada hacia arriba con una aceleración constante. Cuando el haz alcance la pared, lo hará en un punto más cercano al piso dado que el ascensor ha subido una cierta altura mientras el rayo viajaba hacia la pared. De esta forma el haz describe una trayectoria que resulta curvada hacia abajo. Ahora bien, por el principio de equivalencia este mismo efecto de curvatura del haz es lo que deberíamos observar si la cabina estuviera sometida a un campo gravitatorio.

En nuestra experiencia cotidiana nuestra impresión es que la luz viaja siguiendo una línea recta. No percibimos ninguna

traza recta, vista en un plano, como la trayectoria más corta entre el láser y el lugar puntual iluminado. Esta geometría plana se denomina Euclídea, en honor a Euclides, geómetra griego, cuyos postulados elementales aprendemos en la escuela primaria. Sin embargo, Einstein se percató de que ese sentido común quedaría de lado cuando consideramos un rayo de luz atravesando una región cercana a un intenso campo gravitatorio como el del Sol. En tales casos, la línea más corta entre dos puntos ya no es una recta, sino una curva. Como la que obtendríamos al desplazar un dedo sobre un globo terráqueo. Nos veríamos obligados a seguir una línea (curva) llamada geodésica sobre una superficie esférica. La geometría euclídea trata con superficies planas. No es válida sobre superficies curvas. Por ejemplo, mientras el cálculo de la distancia de separación entre dos puntos en el plano puede obtenerse en forma sencilla mediante el teorema de Pitágoras, ésta ya no es una cuestión tan simple de obtener sobre una superficie esférica. Mientras la suma de los ángulos de un triángulo plano es igual a 180° , esa suma será menor si dibujamos el triángulo sobre una superficie cóncava como la de la cara interna de una cuchara y será mayor si lo dibujamos sobre una superficie convexa como el de la cara externa de la cuchara.



Al momento en que Einstein estaba necesitando una

estructura espacial de la gravedad, esta rama de las matemáticas se encontraba en un punto avanzado de desarrollo. Su conocimiento era limitado sobre ellos pero el matemático Marcel Grossman, amigo y colaborador, le ayudó y recomendó emplear la geometría no euclídea de Bernhard Riemann. A través de un objeto matemático denominado tensor métrico, puede calcularse la distancia entre dos puntos de una superficie independientemente de lo arbitrariamente curvado y retorcido que sea esa superficie. Así, Einstein comenzará a desarrollar sus ecuaciones del campo gravitatorio empleando tensores siguiendo los trabajos de Riemann primero, y luego los de Ricci-Curbastro, Levi-Civita, entre otros. El gran acierto de Einstein es haber intuido que la gravedad podía definirse como una curvatura del espacio-tiempo y que matemáticamente podía representarse como un tensor métrico. En los años subsiguientes, trabajará arduamente siguiendo una estrategia física y otra matemática. Bajo la primera buscaba que su teoría de campo gravitatorio se redujera a la teoría newtoniana para campos gravitatorios débiles y estáticos, que preservara las leyes de la física clásica (como ser la conservación de la energía) y que satisficiera el principio de equivalencia por él concebido en 1907. En su estrategia matemática buscaba que sus ecuaciones tuvieran la propiedad “técnica” de ser covariantes, con el fin de que las leyes físicas tengan la misma forma matemática ante cambios o rotaciones en el sistema de coordenadas del espacio y el tiempo.

Sin embargo el camino para la generalización de la relatividad no fue sencillo. Habiendo conseguido en 1912 una ecuación de campo tensorial “prometedora”, la descartó porque, entre otras cosas, creía –erróneamente- que sus



INICIO



SECCIONES



COMUNIDAD



INTERNACIONAL

caso de un campo de U y estático. Pasaría los siguientes años apegado a una estrategia física que no daría frutos. En octubre de 1915, preocupado al constatar que el matemático David Hilbert venía pisándole los talones en el desarrollo de la teoría, abandona súbitamente el curso de pensamiento y retoma la estrategia formal de la teoría de una covarianza general empleando los tensores de Riemann y Ricci. Lo que siguió inmediatamente después fue extraordinario. La Academia Prusiana tenía previsto que Einstein diera cuatro conferencias semanales durante el mes de noviembre. Cuando comenzaron y aún durante, Einstein todavía seguía trabajando frenéticamente en la revisión de su teoría. En la primera conferencia, el 4 de noviembre, contó el trabajo desarrollado durante los últimos años y detalló los problemas que habían surgido en su aproximación física a su teoría de gravitación. En su segunda presentación, el 11 de noviembre, planteó su aproximación usando los tensores de Ricci expresadas bajo condiciones en las que las ecuaciones eran covariantes pero seguía lejos de obtener un resultado acabado. Fue entonces que Mercurio vino (volvió en realidad) en su ayuda. Se sabía desde hacía mucho que la órbita de ese planeta sufría un desplazamiento de su perihelio (el punto en el que se halla más cercano al Sol) de 43 segundos de arco por siglo, que no era explicable con las leyes newtonianas. Se pensó que podía existir otro planeta –incluso se le dio nombre: Vulcano– que pudiera estar perturbando la órbita de Mercurio. El mismo razonamiento sobre las perturbaciones de Urano, Saturno y Júpiter había llevado al descubrimiento de Neptuno. Pero en éste caso, a pesar de haberse calculado donde podría estar, Vulcano no hizo gala de su existencia. Einstein conocía éste cambio en la órbita de Mercurio y había intentado explicarlo dos años antes con el desarrollo más físico de su teoría. Su cálculo arrojaba un frustrante



INICIO



SECCIONES



COMUNIDAD



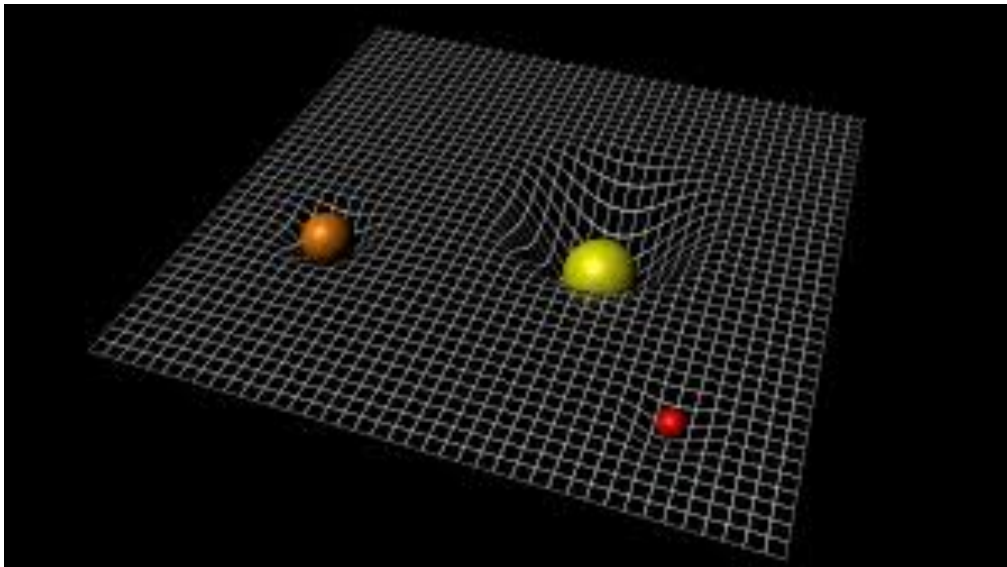
INTERNACIONAL

conferencias y el seguimiento de cerca de Hilbert, Einstein rehizo su cálculo usando el inconcluso formalismo covariante. Su predicción teórica de 43 segundos de arco por siglo resultó correcta y fue triunfalmente comunicada el 18 de noviembre en su tercera conferencia. De “yapa” comunicó otro cálculo: el de la curvatura de la luz proveniente de una estrella cuyo haz pasase cerca de un campo gravitatorio intenso como el del Sol. Con su teoría revisada, obtuvo unos 1,7 segundos de arco. Esta predicción debió esperar casi cuatro años antes de ser comprobada durante un eclipse solar en 1919. El momento más álgido sobrevendría en su cuarta y última conferencia de la serie el 25 de noviembre. Merced a los cálculos que había hecho en la semana anterior sobre el desplazamiento de la órbita de Mercurio y el de la curvatura de la luz, se dio cuenta que podía evitar restricciones y condiciones de coordenadas que había estado imponiendo a sus ecuaciones del campo gravitatorio. Presentó un formalismo más acabado de la teoría de la relatividad general derivando la ecuación que titula esta nota. Es una ecuación tensorial cuya notación compacta con subíndices, no tiene el “*sex appeal*” de su ecuación más célebre, se visualiza alejada de la matemática corriente más afín al profano. No obstante puede hacerse de ella una descripción conceptual. El término izquierdo $R_{\mu\nu}$, - se lee “erre mu nu”- representa el tensor de Ricci. De conjunto, todo el miembro izquierdo representa el modo en que la geometría del espacio tiempo resulta deformada y curvada por los objetos. El miembro derecho, por su parte, describe el movimiento de la materia en el campo gravitatorio. La interrelación entre los dos miembros muestra cómo la materia curva el espacio-tiempo y cómo a su vez dicha curvatura afecta el movimiento de esos cuerpos materiales. El físico John Wheeler lo expresa así: “la materia le dice al



como una suerte de "tango" cósmico: El espacio y el tiempo se convierten en actores en un cosmos en evolución. Cobran vida. La materia de aquí hace que se deforme el espacio allí, lo cual hace que la materia de acá se mueva, y esto hace que el espacio de allá se deforme todavía más, y así sucesivamente. La relatividad general proporciona la coreografía de una danza cósmica de espacio, tiempo, materia y energía.

Una imagen eficaz para resaltar la dinámica del espacio-tiempo en su interrelación con el movimiento de los objetos, es considerar al espacio-tiempo como si fuera una gran superficie elástica. Si soltáramos una bola de billar sobre esa superficie, la masa del objeto deformará y curvará esa superficie. Si luego soltamos otra bola de billar, veremos que éste segundo objeto se mueve siguiendo una trayectoria forzada por la deformación producida por el primero.



La teoría de la relatividad general ofrece la mejor y más precisa descripción de la gravedad, pero no solo eso, también predice nuevos fenómenos que han resultado claves para comprender más profundamente la naturaleza del espacio y

expansion del universo, las ondas gravitatorias, son solamente algunas de las manifestaciones físicas que surgen de ella. A esta altura nadie se sorprenderá si le decimos que el primer modelo cosmológico de nuestra era se debe a Einstein y que aparece como consecuencia de su teoría....pero esa es otra historia.

El dulce de leche, la birrome, son argentinos....una comprobación de la relatividad casi

Cuando en 1911 Einstein se dio cuenta que la luz debía curvarse por la gravedad. Hizo algo que solía hacer en sus trabajos: propuso un experimento. Por entonces había calculado dentro de un desarrollo inmaduro de su teoría que si la luz es influida por la gravedad, la desviación de un rayo de luz procedente de alguna estrella pasando junto a un cuerpo masivo como el del Sol debía ser de unos 0,83 segundos de arco. El primero en tomar la posta de la comprobación experimental fue el astrónomo Erwin F. Freundlich del observatorio de la Universidad de Berlín. Se propuso medir la posición de una estrella que estuviera cerca del Sol en el campo de visión en el momento de ocurrencia de un eclipse, y compararla con medición de la posición que obtendría una vez que el Sol estuviera alejado respecto de ella. La diferencia entre las mediciones sería una evidencia a favor de la teoría.

Una historia poco conocida es que Fruendlich pidió colaboración al astrónomo Charles Perrine que dirigía el Observatorio Nacional Argentino de la Universidad Nacional de Córdoba, para que realizara observaciones en Brasil durante el eclipse solar de 1912. Con instrumentos diseñados y fabricados en Córdoba la expedición argentina partió a



INICIO



SECCIONES



COMUNIDAD



INTERNACIONAL

tuvo un frustrado esta observación. No obstante, Freundlich junto al equipo cordobés de Perrine volverían a intentarlo durante el eclipse del 21 de agosto de 1914 en Crimea. Pero unas semanas antes, estalla la primera guerra mundial, y Freundlich termina detenido por el ejército ruso. Las expediciones inglesas y francesas entre otras se retiran y de 27 que habían en ese momento, quedaron siete para la observación científica del acontecimiento, de las cuales la argentina era la única del hemisferio sur. Durante la ocurrencia del eclipse, el cielo comenzó a nublarse y no se pudo obtener provecho de las fotografías tomadas. Hubo una tercera y última oportunidad más para los argentinos en Venezuela durante el eclipse de febrero de 1916. Con un equipo más modesto y condiciones de nubosidad no del todo favorables, se obtuvieron varias exposiciones pero, nuevamente, no resultaron de utilidad para la contrastar con la predicción teórica. El grupo argentino intentará realizar una cuarta expedición para observar el eclipse total de mayo de 1919, pero la dificultad para conseguir fondos luego de los intentos fallidos, dejarán a la astronomía argentina sin posibilidad de participar de una de las comprobaciones experimentales más importantes de la ciencia del siglo XX.

(1) <http://www.laizquierdadiario.com/A-110-anos-de-la-Teoria-de-la-Relatividad-Especial>

Bibliografía

- Abraham Pais, El señor es sutil...La ciencia y la vida de Albert Einstein, Ariel, 1984.
- Walter Isaacson, Einstein. Su vida y su universo, www.epublibre.org, 2007.



INICIO



SECCIONES



COMUNIDAD



INTERNACIONAL

- Albert Einstein, El significado de la relatividad, Planeta-Agostini, 1985.
- George Gamow, El Breviario del Señor Tomkins, Fondo de Cultura Económica, 1985. (Una explicación divertida de la física relativista y moderna).
- Santiago Paolantonio y Edgardo R. Minitti, Intentos argentinos para probar la teoría de la relatividad, BAAA, Vol. 50, 2007.
<https://historiadelaastronomia.files.wordpress.com/2008/12/2007baaa50359p.pdf>

Si bancás lo que hacemos, sumate a la Comunidad

Nos proponemos, y te proponemos, el objetivo de llegar en los próximos meses a 10.000 colaboradoras y colaboradores que estemos conectados.

Que podamos reflejar la realidad desde abajo y dar pelea a los grandes medios del poder, también depende de vos.

Para poder seguir creciendo sumate a la Comunidad de La Izquierda Diario.

Sumate a la comunidad

TEMAS

Albert Einstein

Teoría de la relatividad

Ciencia y Tecnología

Sociedad

Cultura

 Compartir

Comentarios

DEJAR COMENTARIO



INICIO



SECCIONES



COMUNIDAD



INTERNACIONAL