

Cárdenas, Horacio; Gangui, Alejandro; Iglesias, María; et. al. (agosto 2005). *El año milagroso de Einstein : Movimiento, luz, whisky ... y otros excesos*. En: Encrucijadas, no. 34. Universidad de Buenos Aires. Disponible en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad de Buenos Aires: <<http://repositorioubu.sisbi.uba.ar>>

El año milagroso de Einstein

Movimiento, luz, whisky... y otros excesos

Fue en 1905, entre los meses de marzo y septiembre, cuando luego de cumplir los 26 años Albert Einstein envió a publicar cinco trabajos que sacudieron los cimientos de la física y abrieron nuevas líneas de investigación con un gran e insospechado futuro. Con un lenguaje práctico, este artículo revela la obra del científico a través de la aplicación cotidiana de sus descubrimientos y nos acerca a una faceta humana del gran genio del siglo pasado.

HORACIO CÁRDENAS, ALEJANDRO GANGUI, MARÍA IGLESIAS, EZEQUIEL LESCHIUTTA Y PAULA SANTAMARIA

CEFIEC –Centro de Formación e Investigación en la Enseñanza de las Ciencias–, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Me desperté un viernes y, como el universo se expande, encontrar mi robe de chambre me llevó más tiempo que el usual.” Woody Allen no hubiera podido jamás escribir esta frase si no fuera gracias a –o por culpa de– Albert Einstein.

La expansión del universo, tan globalmente aceptada en la actualidad, es una consecuencia de la teoría de la relatividad (que ha permitido el desarrollo de la “cosmología relativista”). Claro que esta expansión no la vemos como lo sugiere Woody. Pues nosotros sabemos que, aparte de la gravitación, existen otras fuerzas que mantienen “agarrados” entre sí a los mosaicos de la habitación, a las piezas de la casa, a las casas del barrio, a los barrios de la ciudad, y a las ciudades del planeta. En ausencia de dichas fuerzas, la robe de Woody, en efecto, sería arrastrada por la expansión.

Por otro lado, las observaciones astrofísicas modernas que muestran cómo es nuestro entorno astronómico dependen de la luz que recibimos de las estrellas y galaxias lejanas. Para estudiar esa radiación estelar se emplean detectores digitales (como las cámaras fotográficas tan en boga hoy). Dichos detectores convierten la radiación (los corpúsculos de luz o fotones) en impulsos eléctricos. Algo similar sucede con los paneles solares, tanto a bordo de los satélites de comunicaciones como aquí en la Tierra. Estas cámaras y paneles solares no se hubieran desarrollado jamás si no fuese porque emplean el llamado efecto fotoeléctrico, cuya cabal comprensión se logró –nuevamente– gracias a otros estudios pioneros de Einstein, en este caso, realizados hace justo cien años [ver “Efecto fotoeléctrico: ¿Qué es?”].

Y la lista puede seguir... Woody Allen quizá no leyó lo suficiente sobre Einstein, pues de haberlo hecho, hubiera descubierto otros estudios del célebre científico que le aclararían varias cosas más. Pues en otro de sus trabajos de 1905, Einstein explica el extraño movimiento errático de objetos (muy pequeños) que se mueven en zig-zag, hacia adelante y hacia atrás, constantemente y sin una causa bien definida. Hoy bien conocido como el “movimiento browniano”, este andar zigzagueante e impredecible muy bien puede explicar el desplazamiento característico de aquellos que se pasan de copas los jueves a la noche... y que al despertar ven una habitación “en expansión” [ver “El caos, Einstein, el

orden”].

1905: el año de los milagros

Este año –el 2005– es celebrado mundialmente como el Año de la Física y conmemora los primeros cien años de una serie singular de trabajos científicos surgidos del genio de Einstein. Luego de cumplir los 26 años de edad, entre los meses de marzo y septiembre Einstein envió a publicar cinco trabajos (uno de ellos, con el material de su tesis doctoral) que sacudieron los cimientos de la física y abrieron nuevas líneas de investigación con un gran e insospechado futuro.

Los temas de estos trabajos explicaban observaciones pioneras en la naciente teoría cuántica –justamente, el efecto fotoeléctrico–; permitían explicar el comportamiento de las ondas electromagnéticas en diferentes sistemas de referencia –postulando la invariancia fundamental de la velocidad de la luz y, a partir de allí, deduciendo la relatividad de distancias y tiempos para diferentes observadores–; mostraban que, como consecuencia de los “postulados” de la relatividad, la masa resultaba ser una forma de energía convertible en otras formas diferentes –la famosa relación $E=mc^2$ – y, finalmente, explicaban el movimiento errático de pequeñas partículas de polen inmersas en un líquido –el “movimiento browniano”–, que permitiría poner en evidencia firme la existencia de los átomos como constituyentes básicos de la materia.

Todo eso en sólo algunos meses del año 1905, donde debemos además incluir unas cortas vacaciones en Serbia en casa de sus suegros (su esposa Mileva Maric, que venía de una familia Serbia, se había trasladado a Suiza donde conoció a Albert), el estrés de presentar su trabajo de tesis doctoral y, por supuesto, el tiempo que le llevaba trabajar en la Oficina de Patentes de Berna, su verdadera fuente de ingresos para mantener una familia de tres (la pareja ya tenía un hijo, Hans Albert, de un año de edad).

Años fabulosos como el de 1905 no se han producido muchas veces en la historia. En los anales de la física sólo hay unos pocos ejemplos. El período 1665-1666 es quizás el que más rápido acude a la memoria, y sucedió cuando el joven Isaac Newton debió abandonar Cambridge y refugiarse en la tranquilidad de Woolsthorpe Manor, en Lincolnshire, para escapar de la peste que asolaba las grandes ciudades de Inglaterra. Fue allí, en la soledad total de la granja donde había nacido en la Navidad de 1642, que Newton realizó avances revolucionarios en matemática, óptica, física y astronomía. Con menos de 25 años de edad, Newton desarrolló el cálculo diferencial e integral (que llamó “método de fluxiones”), hizo descubrimientos pioneros sobre la luz y el color, y concibió el camino intelectual que años más tarde cristalizaría en su novedosa ley de la gravitación universal, finalmente aparecida en sus Principia de 1687. En sus propias palabras: “Todo esto sucedió en los dos años de la peste 1665-6. Ya que en esos días me encontraba yo en la flor de la edad para la invención y me interesé en matemáticas y en filosofía [ciencias naturales] más que en todo otro momento posterior”. Algo similar a esto afirmaría Einstein –muchos años después– con relación al año 1905.

Relatividad y gran unificación

Quienes lo han escuchado tocar jazz en algún pub de Nueva York, afirman que el clarinete de Woody Allen no suena tan mal. El padre de la relatividad, por supuesto, no se quedaba atrás. Sabemos que Einstein tenía varios hobbies: tocar el violín cuando era joven –sobre todo las sonatas de Mozart– y, ya entrado en años, navegar en total soledad en un pequeño bote a vela. También sabemos que, luego de los papers fundacionales del famoso año 1905, siguieron otros trabajos que llevaron al láser y, en 1915, a la relatividad

general. Esta última fue la teoría que desplazaría definitivamente a la gravitación universal de Newton, luego de más de 220 años de reinado absoluto, y que daría origen –como ya mencionamos– a la posibilidad de un universo en expansión.

Pero eso no es todo: las teorías de la relatividad (la de 1905 y la de 1915) no son sólo importantes para el estudio del cosmos y de los objetos astrofísicos más densos; aunque nosotros mismos nunca lleguemos a desplazarnos a velocidades próximas a la de la luz ni nos acerquemos jamás a un agujero negro, estas teorías son desde hace unos cuantos años también relevantes en nuestra vida diaria [ver “¿Es importante la Relatividad en la vida cotidiana?”].

Entre 1916 y 1925 (año en que visita la Argentina), Einstein siguió haciendo contribuciones notables a la ciencia, especialmente en lo que hace a la teoría cuántica, pero lentamente se fue desilusionando con esta teoría, sobre todo debido al papel preponderante que adquieren las probabilidades –frente a las explicaciones causales– en la descripción del mundo subatómico. De ahí su famosa frase: “Dios no juega a los dados”.

Por el resto de sus días, y hasta su muerte en 1955, Einstein se concentró en la búsqueda de una “teoría unificada de la física”. Una teoría de la que pudieran deducirse la gravitación y el electromagnetismo, así como también la existencia de partículas elementales y las constantes de la naturaleza, como la carga del electrón y el valor de la velocidad de la luz.

Lamentablemente, su búsqueda de la gran unificación no lo llevó a buen puerto. Aparte, había cosas que Einstein no podía conocer en la época, y que no se comprenderían bien sino años después de su muerte, como por ejemplo el accionar de las fuerzas nucleares débil y fuerte. Esto llevó a uno de sus biógrafos, Albrecht Fölsing, a afirmar en 1993 lo siguiente:

“Incluso los más fervientes admiradores de Einstein estarán de acuerdo en que el progreso de la física no habría sufrido demasiado si este científico –el más grande de todos– hubiera pasado los últimos 30 años de su vida navegando”. Estamos seguros hoy de que esta crítica no está bien fundada, no sólo porque su búsqueda de la gran unificación marcó el rumbo que hoy persiguen la mayoría de los físicos teóricos, sino también por el simple hecho de que el famoso paper “EPR” de 1935 (la famosa paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen y su crítica –constructiva– a los fundamentos de la mecánica cuántica) nunca hubiese sido escrito... de haberse pasado Albert todo su tiempo en el bote.

Woody Allen comentó que en una ocasión quiso aprovechar la “curvatura del espacio” para dejarse caer sobre una secretaria (según él mismo, “formada más por ondas que por partículas”) que desconocía las teorías de Einstein (o que conocía muy bien la existencia de las otras fuerzas no gravitacionales). El resultado fue un ojo morado del tamaño de una supernova: “Imagino que la física puede explicarlo todo, salvo a las mujeres” –afirmó nuevamente Woody–, “...le dije a mi esposa que el moretón se debió a que en realidad el universo se estaba contrayendo –no expandiendo– y que, simplemente, en ese momento yo no estaba prestando atención”.

Referencias

–“Strung out”, por Woody Allen, The New Yorker, 28 de julio, 2003, p. 96.

–Para saber más sobre la paradoja EPR, véase la contribución de J. P. Paz a las conferencias del ciclo El Universo de Einstein - sitio web: www.universoeinstein.com.ar (de próxima aparición).

–El espacio-tiempo de Einstein, Rafael Ferraro, Ediciones Cooperativas, Buenos Aires, 2005.

–El Big Bang, la génesis de nuestra cosmología actual, Alejandro Gangui, Editorial Eudeba, Buenos Aires, 2005.

–"Acerca de un punto de vista heurístico referido a la generación y transmutación de la luz", Albert Einstein, Annalen der Physik 17, 132-148 (1905) [disponible en el sitio web arriba mencionado].

–"El demonio de Maxwell", en El breviario del señor Tompkins: en el país de las maravillas la investigación del átomo, George Gamow, Fondo de Cultura Económica, 1985.

Efecto fotoeléctrico. ¿Qué es?

El efecto fotoeléctrico se usa continuamente en los paneles solares que dan energía eléctrica a los satélites, para abrir puertas automáticas o para regular los diafragmas fotográficos, por ejemplo. Pero si la maestra me pregunta, yo contesto: "Es un... es un efecto... relacionado con... mmhh..., donde participan... mmhh... la luz (de foto... fotografía) y... mmhh... algo eléctrico... mmhh... la electricidad..., digo: ¡los electrones!". Bueno, para empezar digamos que no está nada mal. Por un lado tenemos la luz (visible o no) y por el otro, los electrones. Por ejemplo, podemos iluminar los electrones ubicados en una región determinada, como los que están en una plancha de metal.

Pero ¿qué es "efecto"?... El diccionario me comenta que es algo así como un fenómeno, revelado por una experiencia ingeniosa, cuidadosa o compleja, cuya explicación exige un considerable esfuerzo teórico...

Digamos que esa experiencia "ingeniosa" les cayó en las manos –de pura suerte– a unos físicos que, por 1890, estaban ocupados haciendo cosas parecidas. Allí descubrieron que al iluminar una plancha con cierta luz, se desprendían electrones. Estos físicos experimentales ("los iluminadores de planchas metálicas"), después de muchos intentos y mediciones precisas pudieron responder las siguientes inquietudes: ¿Qué pasa al iluminar la plancha con luz más intensa? ¿Qué hacer para que se desprendan más electrones? ¿Con cualquier tipo de luz se desprenden los electrones?

Convergamos en que si bien nosotros podemos encender la luz en un cuarto, no esperemos ver a los electrones salir simpáticamente del picaporte metálico de la puerta. De hecho estas cosas nos pasan desapercibidas, y les han pasado desapercibidas hasta a los más cuidadosos observadores por milenios.

Ahora bien, un físico teórico del 1900 respondería esas preguntas tal vez del siguiente modo: "Si bien no conozco los resultados que obtuvieron los físicos experimentales, me adhiero a un marco teórico (el que está de moda) que podría predecir qué es lo que pasaría. Por un lado tengo a los electrones que considero que son partículas, ya que se pueden identificar con su masa, su carga eléctrica y su ubicación. Por otro lado, considero que la luz, desde que se enciende la lámpara hasta que llega a la plancha metálica, se puede interpretar como una onda, como las que aparecen en un lago sereno luego de haber arrojado una piedra. Es decir, identifico aquellas magnitudes evidentes de la luz como son su color e intensidad, con las variables de una onda: la intensidad de la luz la represento con la amplitud (cuán alto es el bucle de la onda) y el color lo relaciono con la frecuencia (la cantidad de bucles que pasan por segundo). Para que de la plancha se desprendan electrones más veloces, debería exponerla a una luz más intensa... ¿no?... ya que es más energética. El color, por el contrario, no influiría para nada... (no importaría si

se tratase de luz visible, infrarroja o ultravioleta)”.

Sin embargo, esta “teoría”, que tal vez convenza a nuestro parecer, no encajaba con los resultados de “los iluminadores de planchas”. No encajaba para nada, y eso era detestable, pues aquel marco teórico sí servía para los demás experimentos realizados con la luz. O arrojaban a la basura dichos descubrimientos, o se les venía todo abajo. Se necesitaba pues una nueva idea, que quizás exigiese un considerable esfuerzo, o por lo menos alguna explicación ingenua a la que no le importase mucho romper aquel prestigioso marco teórico.

Así fue que Albert Einstein publicó tímidamente en 1905 un artículo transgresor para la época, al cual pocas personas prestaron atención, en el que daba una explicación sencilla del efecto fotoeléctrico. Con su famosa ecuación: “Energía es proporcional a la frecuencia”, o más rigurosamente y usando la notación actual: $E=h.f$ (donde h es la constante de proporcionalidad), Einstein logró interpretar la luz como un chorro de energía cuantificable y localizada, como si se tratara de partículas (canicas) hechas de energía – cuantos o fotones–.

Su valor, el contenido energético de cada canica, vendría entonces determinado por la frecuencia (el color) y no por la intensidad, como se creía. Al iluminar la plancha metálica se produciría un choque entre la “canica luz” y la “canica electrón” (ya que Einstein “consensuó” un poco con los físicos de aquel entonces, considerando al electrón como una partícula). Una canica luz le transferiría toda su energía a una sola canica electrón. Ésta, a su vez, sacrificaría parte de esta energía para poder desprenderse de la plancha y, lo que le sobra, lo emplearía para moverse fuera de ella. Y como la ecuación señalada lo determina, una canica roja (de pequeña frecuencia) le entregaría al electrón menos energía que una canica rayos X (de mayor frecuencia).

Pero este marco teórico se escondió entre los papeles...

Pasaron unos diez años y la predicción de Einstein fue puesta a prueba experimentalmente por Robert Millikan, quien con nuevas y precisas mediciones pudo obtener el siguiente gráfico (ver en esta página).

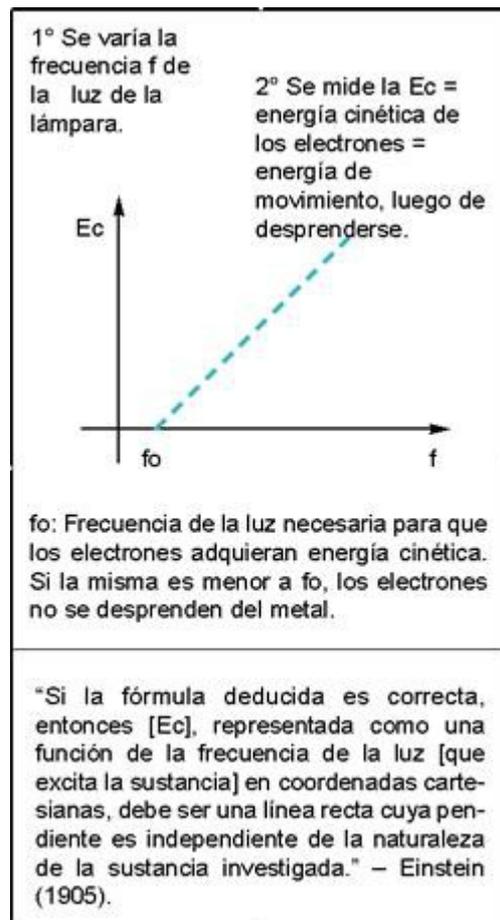
¿Y adivinen qué? ¡Concuerda con las formulaciones hechas por Einstein! Esto lo hizo merecedor del Premio Nobel.

Gracias a esta teoría se pudieron construir tecnologías como las mencionadas al principio de este apartado. Ahora la cantidad de electrones desprendidos se explica por la intensidad de la luz: mayor intensidad de luz = mayor cantidad de canicas de luz que chocan con los electrones = mayor cantidad de electrones que se desprenden. En el caso de las puertas automáticas del ascensor, al obstruir con el pie el camino que recorrería la luz, desde una “lamparita” a un “receptor” (símil a una plancha metálica), este último recibe entonces una intensidad de luz nula, por lo que no se activa la circulación de electrones en el circuito, y la puerta queda abierta.

Pero entonces, ¿qué es la luz?, ¿onda o partícula? Para simplificar digamos que lo que para la época fue un dolor de cabeza, ya que regía el principio de “o lo uno o lo otro”, posteriormente se convirtió en una de las más importantes contribuciones a la física cuántica: “tanto lo uno como lo otro” (dualidad onda-partícula).

Así los físicos cuánticos dejaron de utilizar modelos clásicos de partícula y de onda y se

inmiscuyeron con nuevos modelos mentales en un mundo microscópico donde rigen otros principios que contradicen nuestro sentido común.



El caos, Einstein, el orden

Hace poco leí un cuento en donde al personaje le sucedían cosas muy extrañas. Una noche muy fría de invierno, el Sr. Tompkins se encontraba disfrutando de un exquisito whisky en el living de su casa. De repente, comenzó a sentir que las paredes de la habitación se alejaban, agrandándose el ambiente indefinidamente mientras él mismo comenzaba a flotar en el aire.

¡Tanto se agrandaron los objetos que en un momento se sintió flotando dentro de su, ahora gigantesco, vaso de whisky! Decidido a inspeccionar a su alrededor, empezó a nadar por la bebida. Allí se encontró con un espacio surcado por muchísimas pelotitas semitransparentes que parecían tener una complicada estructura interna y que, finalmente, pudo reconocer como moléculas de agua y alcohol. Además, observó otras estructuras mucho más grandes que se movían sin cesar y en todas direcciones, debido a los innumerables golpes que recibían por parte de las moléculas de agua. Estas moléculas, que describían un movimiento zigzagueante, eran de cebada, sustancia que le da ese sabor y color tan característico a la bebida.

Esta sensación tan extraña para el personaje –quién sabe si producida por los efectos del whisky– le permitió observar de cerca la manifestación del movimiento browniano que presentaban las moléculas de cebada. Éste es el movimiento que nos interesa explicar aquí.

Allá por el año 1828, a Robert Brown, un botánico muy reconocido de la época, le llamó muchísimo la atención el comportamiento que tenían ciertos granos de polen que se encontraban en un pequeño volumen de agua. Brown observó en su microscopio que no sólo estos granos se movían de manera caótica e impredecible (como la cebada en el vaso del Sr. Tompkins) sino que, además, lo hacían de manera continua, es decir, que no dejaban de moverse nunca.

Entonces... “¿Cómo es posible que estas partículas se muevan sin parar, de aquí para allá? –se preguntó Brown–, ¿qué es lo que provoca que los granos de polen se muevan?”

Varias fueron las hipótesis formuladas, no sólo por Brown, para darle una explicación a este fenómeno: ¿será que el polen tiene vida?, ¿será debido a una fuerza externa que impulsa el movimiento?, ¿será producido por la luz?, ¿será quizá debido a las fuerzas de capilaridad?...

O ¿por qué no pensar que se deba a diferencias de temperatura existentes entre dos regiones del líquido...? En fin, muchísimas interpretaciones surgieron en momentos de Brown y posteriores a su trabajo, pero ninguno de los interesados en el tema logró, de manera satisfactoria, comprobar alguna de las hipótesis planteadas.

Paralelamente, entre 1850 y 1875, los científicos Maxwell, Clausius y Boltzmann desarrollaron las bases de la moderna teoría cinética de la materia en la cual se postulaba que las sustancias estaban conformadas por átomos. Este aporte, tan aceptado en nuestro siglo, no lo era en aquel entonces, ya que existían dos bandos claramente diferenciados: los que abogaban por una visión atomista de la materia y los que no. Después de todo, cuando al físico y filósofo Ernst Mach se le preguntó si creía en los átomos, él respondió: “¿Ha usted visto jamás alguno?”.

Ahora bien, en el nivel macroscópico ya estaban sentadas las bases de la Termodinámica con sus dos leyes fundamentales que, como muchos de ustedes sabrán, pudieron ser deducidas y aplicadas sin necesidad de definir cómo estaba constituida la materia. De esta manera, llegamos al siglo XX con un panorama un tanto confuso y lleno de controversias. Pero entonces, ¿por qué se mueven sin parar los granos de polen? Afortunadamente el misterio llegó a su fin en 1905, gracias a los aportes de Albert Einstein.

En ese año, Einstein publicó un artículo titulado “Acerca del movimiento, requerido por la teoría cinética molecular del calor, de pequeñas partículas suspendidas en un líquido estacionario”, en el que muestra sus estudios sobre el movimiento browniano. En dicho artículo explica el fenómeno haciendo uso de la mecánica estadística, estudiando el desplazamiento promedio de las partículas suspendidas.

Einstein explicó que el movimiento browniano es el movimiento desordenado de las partículas en suspensión, que son golpeadas constantemente por las moléculas de agua. Este billar microscópico desplaza a las partículas en una dirección y otra, dándoles una trayectoria característica en zig-zag (Figura 1). Si bien las moléculas de agua son suficientemente pequeñas en comparación con las partículas en suspensión, son capaces de perturbar a un cuerpo de tamaño bacteriano (de hecho, muchas bacterias y otros microorganismos son afectados por este fenómeno). Cuanto más liviana es la partícula, más sensible se hace su movimiento al chocar con las moléculas del fluido y, en

consecuencia, más irregular e impredecible es su trayectoria. Einstein adoptó una visión claramente atomista al considerar al líquido no como una distribución continua de masa, sino como una acumulación discreta de moléculas.

Como mencionamos muy superficialmente más arriba, los átomos y las moléculas habían formado parte del pensamiento de los químicos (y de los físicos y filósofos) durante siglos a pesar de que no se tenían evidencias claras de su existencia. Tan sólo eran utilizados de manera conveniente para realizar ciertas estimaciones o, sencillamente, eran considerados poco relevantes y hasta inexistentes. Gracias a la publicación de Einstein de la “teoría molecular de los líquidos” que subyace al movimiento browniano, se ofreció la oportunidad de realizar una medición directa de las propiedades atómicas.

Entre los años 1908 y 1911, el equipo del físico francés Jean Perrin no sólo logró comprobar experimentalmente las predicciones de Einstein, sino que pudo estimar, además, el tamaño de las moléculas de agua. Evidentemente, la controversia atomismo-antiatomismo quedaba saldada y, por primera vez, el átomo era reconocido como un modelo eficaz para describir la realidad.

El legado científico de Einstein referido al movimiento browniano se deja sentir hoy día fuertemente (no por nada, éste fue su trabajo más citado del año 1905, muy por encima del de la relatividad o del efecto fotoeléctrico). Desde la comprobación experimental realizada por Perrin, el movimiento browniano ha permitido que los físicos ataquen problemas muy variados y ha sido aplicado en campos muy diversos, desde el funcionamiento de una célula hasta las fluctuaciones de la bolsa de comercio. Por ejemplo, se han construido modelos matemáticos que describen el transporte de proteínas en la célula, utilizando una especie de minúsculos motores moleculares. Por otro lado, los llamados trinquetes brownianos utilizan las vibraciones producidas por los choques que reciben las partículas brownianas para convertir el desplazamiento aleatorio e impredecible en movimiento controlado. Estos dispositivos son utilizados, entre otras cosas, para separar fragmentos de ADN en un tiempo notablemente menor en comparación con los métodos empleados habitualmente.

¿Es importante la Relatividad en la vida cotidiana?

“—¿Cree usted, profesor, que en el porvenir, su teoría ha de producir efectos prácticos? — volví a preguntar.

—No lo creo —me respondió el profesor—, mi teoría de la relatividad es tan abstracta, en sí, que no puede, bajo ninguna forma, materializarse.”

Fragmento de la entrevista de A. Fernández Arias para la revista Caras y Caretas (abril, 1925).

Usted se preguntará, amigo lector: ¿ha cambiado acaso la vida social después de las formulaciones tan aparentemente abstrusas de la relatividad? ¿Tiene influencia esta teoría en las vicisitudes de nuestro planeta o está reservada tan sólo a lejanos quásares y misteriosos agujeros negros?

Pues la respuesta es que sí la tiene, y mucha. Vale decir que sin el aporte de Einstein y de sus seguidores muchas cosas serían diferentes. Un buen ejemplo es el célebre Sistema de Posicionamiento Global, más conocido como GPS. Nacido en 1973 en los Estados Unidos de Norteamérica y gestionado por el Departamento de Defensa con un claro objetivo militar (¿algo que ver con la Guerra Fría?), el GPS fue abierto para usos civiles en 1980. Hoy es usado para localizar posiciones con extrema precisión.

El dispositivo está basado en una constelación de 24 satélites orbitando la Tierra de forma tal que desde cualquier punto estén siempre a la vista al menos cuatro de ellos. Cada satélite da dos vueltas diarias al planeta moviéndose a unos 14.000 km/h y a una altitud de 20.000 km.

Como si se tratara de faros estelares, cada satélite emite una “señal de cronometraje” hacia los receptores en tierra con la cual envía codificado el tiempo exacto en que ésta fue emitida, información proporcionada por un reloj atómico muy preciso que viaja dentro del satélite. Con este dato, el aparato receptor calcula el intervalo de tiempo Dt que dicha señal estuvo viajando y de este modo (multiplicando sencillamente ese Dt por la velocidad a la que viajó la señal, es decir, la de la luz c : 300.000 km/seg aproximadamente) obtiene la distancia que lo separa del satélite. Luego, con los datos de otros tres satélites puede calcular, por triangulación, su propia posición tridimensional (altitud, latitud y longitud).

Lo importante del caso es que para que esa distancia calculada a partir de la señal sea lo más precisa posible, los relojes de los satélites y los de la Tierra deben estar perfectamente sincronizados. Esto bien podría ser en principio una cuestión de exactitud instrumental, pero he aquí que con una buena maquinaria y una organizada logística no es suficiente. Sin el conocimiento de los resultados de la Teoría de la Relatividad este sistema no funcionaría correctamente. Veamos por qué.

Por un lado, la magnitud de la velocidad relativa entre los satélites y las posiciones terrestres determina un corrimiento temporal de acuerdo con lo que establece la teoría de la relatividad especial. O sea: vistos desde aquí abajo, los relojes satelitales atrasan. Este aplazamiento se conoce como efecto de dilatación temporal. Empleando el valor de la velocidad entre los dos sistemas, se calcula un corrimiento en la sincronización de los relojes de aproximadamente 7 microsegundos (7 millonésimas partes de un segundo) al cabo de un día.

Por otro lado, dada la altura a la que orbitan los satélites, la magnitud del campo gravitatorio que soportan es unas cuatro veces menor que sobre la superficie terrestre. Esto, de acuerdo con la relatividad general, implica que la curvatura del espaciotiempo es diferente en ambos puntos y por ello la marcha de los relojes, según las predicciones de la teoría, se altera. O sea: vistos desde aquí abajo, los relojes satelitales adelantan. Los cálculos indican que la diferencia resulta ser de aproximadamente 45 microsegundos por día.

Entonces, correcciones relativistas debidas a las altas velocidades y la modificación de la geometría del espaciotiempo debida a la presencia de la Tierra predicen una diferencia entre los relojes de los satélites y los terrestres de unos 38 microsegundos por día. El lector dirá, con todo derecho, en qué me afecta tal desajuste, si 38 microsegundos no alcanzan ni para peinarse. Eso es cierto: un intervalo tan pequeño resulta muy poco familiar. Sin embargo, este desarreglo afecta considerablemente la precisión del sistema GPS, pues si bien es un íterin muy pequeño en los tiempos de nuestras vidas, es cuantiosamente grande para las travesías de la luz. En ese lapso la señal recorre una distancia de... ¡11,4 kilómetros! (multiplique $c \cdot Dt$ y sorpréndase usted mismo). Vale decir que en un minuto (si no se tuvieran en cuenta las predicciones de la relatividad) la falla sería de más de 26 nanosegundos, el tiempo que tarda la luz en recorrer cerca de 8 metros.

Conclusión: si nos interesa conocer la posición de un objeto con un error de menos de 10

metros, debemos agradecer continua y repetidamente, una vez por minuto, los aportes del querido Einstein.