¡Que no le engañen: Einstein tenía razón después de todo!

Pedro J. Hernández González pjhez@navegalia.com

Abril de 2001. No reproducir sin permiso

La revista Time eligió a Albert Einstein como la personalidad más importante del siglo XX, un merecido homenaje póstumo al primer intelectual que pasó a formar parte del star-system de occidente. El atractivo indudable de un personaje como Einstein, unido a una teoría como la Relatividad, que parece malograr todas nuestras nociones intuitivas de distancias y tiempos, constituyen una mezcla explosiva que no deja a nadie indiferente. La prueba de ello es la cantidad de artículos, libros y páginas web que claman el sinsentido de la teoría. Esta corriente, que podemos denominar anti-relativista, nació en el momento de publicarse la teoría y no ha decaído hasta hoy en día, a pesar de la progresiva acumulación de evidencias experimentales y observacionales.

Nuestro objetivo aquí se centrará en intentar esclarecer algunos malentendidos en torno a la teoría de la relatividad.

¿Es complicada la Teoría de la Relatividad?

La labor central de las ciencias naturales es llegar hasta lo ordinario: mostrar que la complejidad, correctamente entendida, es sólo simplicidad enmascarada; encontrar patrones ocultos en el caos aparente.

Herbert Simon

Richard P. Feynman, premio Nobel de física en 1965 y seguramente el mejor físico teórico de la segunda mitad del siglo XX, empieza a explicarnos el concepto de velocidad instantánea de una manera memorable. En la sección 8.2 del tomo I de sus conocidas lecciones de física escribe: *En el lugar donde un policía para a la dama en el auto, el policía se le acerca y le dice: “¡Señora, usted iba a 100 kilómetros por hora!”. Ella dice: “Eso es imposible señor, he estado viajando sólo siete minutos. Es ridículo, ¿cómo puedo ir a 100 kilómetros por hora cuando no he viajado una hora?”. ¿Cómo responderían si fueran el policía?. Por supuesto, si fueran realmente el policía no habría sutilezas; es muy simple, dirían: “¡Cuénteselo al juez!”. Pero supongamos que nosotros no tenemos esa salida y hacemos un ataque intelectual más honesto al problema... [¿Cómo saldríamos de esta encerrona?].*

La ciencia es una empresa que a la mayoría de nosotros resulta complicada. Hasta un concepto aparentemente tan sencillo como el de velocidad requiere de una definición precisa y sin ambigüedades para que nos sea realmente útil, de un refinamiento que denominamos velocidad instantánea y que requiere del uso de un concepto matemático abstracto como es el de derivada. Pero el concepto básico no tiene por qué resultar complicado ni antinatural. Como señalaba el mismo Albert Einstein: *“La ciencia no es más que un refinamiento del pensamiento cotidiano”.*

La Teoría Especial de la Relatividad se basa en dos principios físicos que todos podemos comprender fácilmente. Permítanme que los enuncie de una manera algo informal.

1. Ningún experimento de física que ustedes puedan realizar en el interior de cualquier vehículo que se mueva a velocidad constante (sistema inercial) les dará información sobre la velocidad a la que se están moviendo. Ésta es una versión del conocido **Principio de Relatividad**, que fue enunciado por primera vez de manera explícita por Galileo Galilei.
2. En particular, cualquier medida que ustedes hagan de la velocidad de la luz dará el mismo valor, independientemente del sistema inercial en el que ustedes se hallen. Este es el **principio de constancia de la velocidad de la luz**.

Y ya que hemos abierto la veda de la informalidad, permítanme mostrarles que la Teoría General de la Relatividad no tendría que tener esa fama de oscura que se ha ganado injustamente con los años. Modificando ligeramente los principios anteriores tenemos los fundamentos de la Teoría General de la Relatividad:

1. Todos los experimentos locales de física que ustedes puedan realizar dentro de un vehículo en caída libre darán los mismos resultados que experimentos similares realizados en un sistema inercial (**Principio de Relatividad generalizado**).
2. En particular, cualquier medida local que ustedes hagan de la velocidad de la luz dará el mismo valor, independientemente del sistema en caída libre en el que se hallen (**Principio de constancia de la velocidad de la luz**).

Como el lector podrá observar sólo hemos cambiado sistema inercial por sistema en caída libre y hemos concretado medida añadiéndole el término local. Caída libre se refiere al simple hecho de apagar motores y dejarse llevar por la fuerza gravitatoria sin oponer ningún tipo de resistencia. Medida local quiere decir que la medida tiene que ser realizada a distancias cortas y durante intervalos de tiempo pequeños.

Ahí tienen ustedes los principios básicos. La parte difícil consiste en concretar esos principios y en manipularlos de forma cuidadosa. El lector podría conseguir una buena y entretenida introducción a la Teoría de la Relatividad a un nivel matemático elemental leyendo en el orden indicado Gamow (1965), Hewitt (1992), Wheeler (1990) y Geroch (1978)

¡Ajá: paradojas en relatividad!

Los observadores se dividen en dos clases: aquellos que dividen a los observadores en dos clases y aquellos que no lo hacen.

Paráfrasis anónima

Una paradoja no es más que una situación que analizada de una manera da un resultado y analizada de otra manera produce un resultado incompatible con el anterior. La paradoja de los mellizos es el paradigma de paradoja relativista. Tal ha sido su influencia en el pensamiento popular que todavía muchos la ven como una contradicción con la que tiene que vivir la relatividad especial. Veamos en qué consiste.

Imaginemos una pareja de gemelas: Consuelo y Estrella. Estrella parte en un cohete que se mueve al 87% de la velocidad de la luz y viaja durante 1 hora (según su reloj), dando la vuelta y regresando en otra hora. Cuando regresa observa que su gemela Consuelo ha envejecido media hora más que ella (el famoso efecto de dilatación del tiempo). Pero ¡esperen un momento!. El Principio de Relatividad nos dice que podemos cambiar el punto de vista y tomar el de Estrella, que ve a su hermana Consuelo alejarse y acercarse sucesivamente. ¿No tendría que encontrar Consuelo a Estrella envejecida media hora más que ella?. Pero, ¿cómo pueden diferir en los resultados?. La relatividad parece llevarnos al absurdo.

Recuerden que la ciencia es pensamiento refinado. Vayamos poco a poco. Pongamos a Estrella y a Consuelo a emitir pulsos luminosos a intervalos de 6 minutos según sus relojes. Como Estrella viaja durante dos horas, una hora de ida y otra de vuelta según su reloj, emitirá un total de 10 pulsos luminosos en cada trayecto. Mientras se aleja y debido al efecto Doppler, los pulsos de Estrella le llegan a Consuelo con la mitad de frecuencia, uno cada 12 minutos según el reloj de Consuelo. Hemos elegido precisamente la velocidad apropiada para que la frecuencia sea la mitad y el razonamiento sea más sencillo. Cuando Estrella se acerca, los pulsos llegan a Consuelo con el doble de frecuencia, uno cada 3 minutos, pues las frecuencias de acercamiento y alejamiento son recíprocas en el efecto Doppler relativista. En total, para Consuelo han pasado entonces

$$12 \text{ minutos} \times 10 \text{ pulsos} + 3 \text{ minutos} \times 10 \text{ pulsos} = 150 \text{ minutos} = 2 \text{ horas y media}$$

Mientras que para Estrella han pasado sólo dos horas.

Veamos lo que ocurre con la situación analizada desde el punto de vista de Estrella. Ésta recibe un pulso cada 12 minutos mientras se aleja. Pero como se está alejando durante 1 hora, siempre según su propio reloj, sólo cuenta 5 pulsos en el camino de ida. Mientras regresa, los pulsos llegan cada 3 minutos y puede contar 20 pulsos. En total, recibe 25 pulsos en sus dos horas de viaje. Pero el tiempo que necesita Consuelo para enviar 25 pulsos es según su reloj

$$25 \text{ pulsos} \times 6 \text{ minutos} = 150 \text{ minutos} = 2 \text{ horas y media.}$$

Para todo el análisis anterior sólo hemos utilizado el principio de constancia de la velocidad de los pulsos luminosos, que es el mismo visto tanto por Consuelo como por Estrella.

Como vemos todo encaja perfectamente y no hay paradoja. ¿Qué hemos pasado por alto entonces en el análisis inicial de la paradoja?. ¿Acaso los dos observadores no son equivalentes como requiere el Principio de Relatividad?. La idea básica es que la situación parece simétrica respecto a cada melliza, pero no lo es. Estrella cambia de sistema inercial, lo que se refleja en la puesta en marcha de los motores para detener la nave y hacerla cambiar de sentido, mientras que Consuelo permanece todo el tiempo en el mismo sistema inercial. En otras palabras, existe un experimento puramente físico que nos permite distinguir entre Estrella y Consuelo: la medida de una aceleración.

Por supuesto los anti-relativistas no se han conformado nunca con esta sencilla explicación. Resulta extraño que una idea tan simple dé para tanto juego. Un ejemplo de análisis un tanto bobo de la paradoja de los mellizos se puede encontrar en una sección titulada “Relatividad, ¿broma o estafa?” del libro de Federico di Trocchio *Las mentiras de la ciencia* (Alianza editorial 1998), un triste ejemplo de que cualquiera puede escribir un libro sobre aquello de lo que no tiene ni idea.

¿El lector no ha entendido nada?!. No se preocupe. Es seguramente la primera vez que se enfrenta usted a este tipo de razonamientos. Una explicación más detallada a un nivel muy simple puede hallarse en Hewitt (1992). Todo tipo de paradojas relativistas son analizadas con todo detalle en Baez (1998).

¿Es posible superar la velocidad de la luz?

Nada viaja más rápido que la luz con la posible excepción de las malas noticias, que obedecen sus propias leyes especiales.

Douglas Adams

Supongamos que vemos partir dos naves en la misma dirección pero en sentidos opuestos a digamos un 60% de la velocidad de la luz. Para un observador que se quede en tierra, la distancia entre las naves aumenta a un ritmo del 120% de la velocidad de la luz. Luego ¿existen velocidades mayores que la de la luz en relatividad!. Seamos cautelosos y razonemos con cuidado. ¿Qué es la velocidad?. La velocidad no es más que la división entre la distancia cubierta por un objeto y el tiempo que tarda en cubrir dicha distancia medidas por un determinado observador. Bien, el observador en tierra ve ambas naves moviéndose al 60% de la velocidad de la luz. El observador situado en cualquiera de las dos naves verá a La Tierra alejarse con una velocidad del 60% de la velocidad de la luz, y a la otra nave alejarse a una velocidad del 88% de la velocidad de la luz (según las medidas realizadas desde su sistema inercial). Nadie ve a ningún objeto moverse a mayor velocidad que la luz.

Esto que acabamos de formular es otro de los argumentos que suelen emplear los anti-relativistas más ingenuos para demostrar que es posible encontrar velocidades superiores a la velocidad de la luz en relatividad.

El hecho de que se afirme habitualmente que no es posible superar la velocidad de la luz, se basa en dos consideraciones, una bastante sólida desde el punto de vista de la física (el argumento energético) y otro argumento mucho más discutible (el argumento del viaje al pasado):

1. **El argumento energético** tiene como base la más famosa de las ecuaciones de la física $E = mc^2$ (E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz). La masa m es una cantidad que

aumenta con la velocidad v de la forma $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, siendo m_0 la masa en reposo del

objeto. Esto deja claro que incluso aproximarse a la velocidad de la luz requiere de cantidades inmensas de energía.

2. **El argumento del viaje al pasado.** Para cualquier objeto que se mueva a una velocidad superlumínica siempre es posible encontrar a un observador inercial que lo vea viajar al pasado, lo que se considera habitualmente como absurdo debido a lo que se conoce con el término general de Paradoja del Abuelo: si uno viaja al pasado y mata a un ancestro parece crear un problema en el orden causal de los acontecimientos. El lector interesado en este punto debería acudir a Thorne (1994) y Baez (1998).

Después de las consideraciones anteriores resulta algo extravagante que incluso investigadores serios aparezcan en los medios proclamando haber superado la velocidad de la luz. El caso más reciente, con un gran eco en los *mass media*, fue el de los experimentos con pulsos luminosos realizados por un equipo del NEC Research Institute de Princeton y publicados en la prestigiosa revista *Nature* el 20 de julio de 2000. Aunque los propios investigadores hacen un análisis correcto del experimento, donde afirman categóricamente que no tiene nada que ver con los fundamentos de la teoría de la relatividad, la forma de comunicar sus resultados no es desde luego buena divulgación científica (véase Collins 2000).

La existencia habitual de este tipo de situaciones hace recomendables el uso de las siguientes reglas de oro:

1. Desconfiar de cualquier nueva idea que intente sustituir a una idea bien establecida.
2. Desconfiar de cualquier experimento cuyos resultados no estén de acuerdo con las ideas bien establecidas.
3. Desconfiar de las ideas establecidas y ponerlas a prueba todo el tiempo, pero aceptar sus resultados hasta que haya suficientes evidencias de que la idea no funciona.

El lector estará pensando que esto es muy conservador, que así no llegaríamos a ningún lado. Pero eso es precisamente lo que hace que las nuevas ideas tengan que luchar duro y que las ideas que se establecen firmemente raramente terminen por ser del todo erróneas. Es lo que hace que el método científico funcione de forma tan eficiente.

Viajes interestelares rápidos y viajes en el tiempo.

No es lo mismo posible, que plausible, que probable, o que probado. Lo posible incluye todas las ideas que no violan los principios básicos de la ciencia; lo plausible limita más, porque dentro de lo posible toma aquello que razonablemente se podría comprobar. Lo probable describe la ciencia normal, el avance en áreas desconocidas de la mano de lo que se conoce. Finalmente, lo probado supone la aplicación de los principios y la comprobación de las hipótesis.

Nicholas J. Turro

En la novela de Carl Sagan *Contacto*, la protagonista Eleanor Arroway viaja hasta la estrella Vega situada a 26 años luz a través de lo que se conoce como un agujero de gusano, usando un artilugio técnico impresionante cuyas instrucciones de construcción fueron enviadas por una civilización tecnológicamente mucho más avanzada que la nuestra. Sagan quiso mantenerse fiel en su novela a los principios de la ciencia y preguntó a uno de los mayores expertos mundiales en Relatividad General, Kip S. Thorne, si esa situación entraba al menos dentro de *lo posible*. La mejor respuesta que pudo dar Thorne es que efectivamente no existe ningún principio físico conocido que lo haga imposible, pero sí que se han propuesto mecanismos que hacen poco probable la existencia de un agujero de gusano (Thorne 1994).

Un agujero de gusano no es más que un camino alternativo que conecta dos regiones del espacio. Los agujeros de gusano son soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein descubiertas ya desde 1916, poco después de que Einstein publicara la Teoría General de la Relatividad. Como en Relatividad el espacio y el tiempo son entidades inseparables, los agujeros de gusanos, en caso de existir, también podrían ser utilizados como máquinas del tiempo.

Todo esto parece abrir una caja de Pandora de la que podrían salir desde civilizaciones avanzadas extraterrestres que utilizan agujeros de gusano como si de un metro intergaláctico se tratara hasta viajeros del tiempo, pasando por las entidades favoritas de los autores New Age: los universos paralelos y las otras dimensiones. Sería muy largo aquí esgrimir todos los argumentos que ponen en su contexto adecuado todas estas ideas. Dirijo al lector interesado a Thorne (1994).

La mejor reflexión que puedo hacer en pocas palabras sobre la situación actual en esta cuestión es citar a Douglas Adams, autor de la desternillante *Guía del Autostopista Galáctico* y sus secuelas: “*La primera cosa que uno tiene que notar sobre los universos paralelos es que no son paralelos. También es importante notar que, estrictamente hablando, estos no son ni siquiera universos. Pero es más fácil si uno lo intenta un momento más tarde y después de haber notado que todo lo que uno ha notado hasta ese momento no es cierto*”.

¿Está bien contrastada la teoría de la Relatividad?

Las personas razonables se adaptan al mundo tal y como es. Las personas irrazonables tratan de adaptar el mundo a sus propios intereses.

Adaptado de una cita de George Bernard Shaw

Una de las alegaciones preferidas de los anti-relativistas es que la Relatividad es sólo una teoría, como si esto fuera un punto en su contra. El asunto aquí es que muchas veces se usa la palabra teoría en su sentido popular como sinónimo de hipótesis especulativa. Pero en ciencia una teoría es mucho más que una hipótesis especulativa.

Precisamente la Teoría de la Relatividad sería uno de los mejores ejemplos de lo que se entiende por una teoría en ciencia. Una de las características básicas de una teoría es su capacidad de predecir el resultado de experimentos u observaciones que hagamos de un fenómeno natural.

La teoría de la Relatividad ha pasado todos los tests a la que ha sido sometida hasta la fecha, y estos son ciertamente numerosos, demasiados para hacer aquí una relación [véase Baez (1998)]. Hay un momento en que una teoría alcanza tal grado de madurez que empieza a producir aplicaciones de uso cotidiano. Es el momento en que quedamos suficientemente impresionados, la cosa funciona y empieza a ser difícil negar que la teoría es al menos una buena aproximación a la realidad de los fenómenos que pretende explicar.

El uso cotidiano de un GPS (Global Positioning System) —una red de 24 satélites usados para determinar posiciones sobre la Tierra con una precisión de hasta unos pocos metros— con la precisión requerida sólo es posible después de corregir las medidas de distancias de dos efectos relativistas. El primero no es más que la dilatación temporal que sufre el reloj del satélite debido a su velocidad y es de unos 7 microsegundos al día. El otro efecto es el de dilatación temporal de un reloj situado en regiones de gravedad más intensa con respecto a un reloj situado en una región de menor gravedad, como predicho por la Relatividad General. Esto hace que el reloj del satélite adelante unos 46 microsegundos diarios y es como vemos la contribución principal. El efecto parece pequeño, pero el desajuste de los relojes implicaría, en caso de no ser corregido, un error acumulado en las medidas de distancia del orden de uno 10 km diarios.

Curiosamente la solución a las ecuaciones de Einstein que permite calcular el efecto principal sobre el reloj de un satélite en órbita es la misma que predice la posibilidad de existencia de agujeros negros, extraños objetos sobre los que el mismo Einstein mantuvo siempre un vigoroso escepticismo. Y sin embargo, las evidencias acumuladas hasta hoy hacen prácticamente inevitable la existencia por doquier en nuestro universo de estos objetos tremendamente compactos.

Pero por supuesto hay quien mantiene que el sistema de navegación GPS no usa para nada la teoría de la Relatividad y que todo es parte de una conspiración en la que estarían implicados incluso premios Nobel como Steven Weinberg o Sheldon Glashow. Es lo que declaró el astrónomo Tom Van Flandern, que una vez trabajó para el U.S. Naval Observatory, a la revista *American Spectator* en abril de 1999. Van Flandern dirige una web alternativa (www.metaresearch.org) en la que se mantienen todo tipo de ideas alternativas a la física y astrofísica estándar. Y aunque todo este discurso ha sido perfectamente desmontado por expertos en relatividad y cosmología (Hillman 2001), Van Flandern no se rinde y defiende incluso que Einstein era un impostor. ¿Cuáles son las intenciones de Van Flandern?. Nadie podría decirlo (Farrell 2000).

Breve reflexión final.

¿Por qué existe una corriente anti-relativista tan notoria y tan duradera?. La respuesta no es sencilla. En el caso de Darwin y la teoría de la evolución lo tenemos fácil, pues no es más que un enfrentamiento directo entre pensamiento religioso y pensamiento científico, entre lo que creemos sobre nuestra propia naturaleza y lo que deducimos de ésta a través del método científico. Los anti-relativistas no suelen atacar el éxito predictivo de la teoría de la Relatividad, sino que más bien claman por una explicación más sencilla o más intuitiva. Por esto, a parte del hecho obvio de que algunos autores sólo quieren notoriedad y vender algunos libros, otros autores han sido víctimas del aura mítica con la que han sido rodeados tanto la Teoría de la Relatividad como su autor desde su misma aparición. Quizás sólo sea otra consecuencia más de la falta de buena comunicación entre ciencia y sociedad y del triste e inexplicable hecho de la ausencia de la Teoría de la Relatividad en los currículos de la mayoría de cursos de física básica.

Referencias

- Baez, John. 1998. *Usenet Relativity FAQ*
<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/relativity.html>
- Collins, Chris. 2000. *Trick of the light*
<http://www.salon.com/people/feature/2000/08/03/light/index.html>
- Farrell, John. 2000. *Did Einstein Cheat?*
<http://www.salon.com/people/feature/2000/07/06/einstein/index.html>
- Gamow, George. 1965. *El breviario del señor Tompkins*. § I-III. Fondo de Cultura Económica-España. 1993.
- Geroch, Robert. 1978. *La relatividad general (de la A a la B)*. Alianza. 1985
- Hewitt Paul G. 1992. *Física Conceptual*. §15. Segunda Edición. Addison-Wesley Iberoamericana. 1998

- Hillman, Chris. 2001. *Refutations of Some Incorrect/Erroneous/Vacuous Claims about Cosmology and Relativity*. <http://math.ucr.edu/home/baez/RelWWW/wrong.html>
- Thorne Kip S. 1994. *Agujeros negros y tiempo curvo*. Crítica. 1995
- Wheeler, John A. 1990. *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*. Alianza. 1994