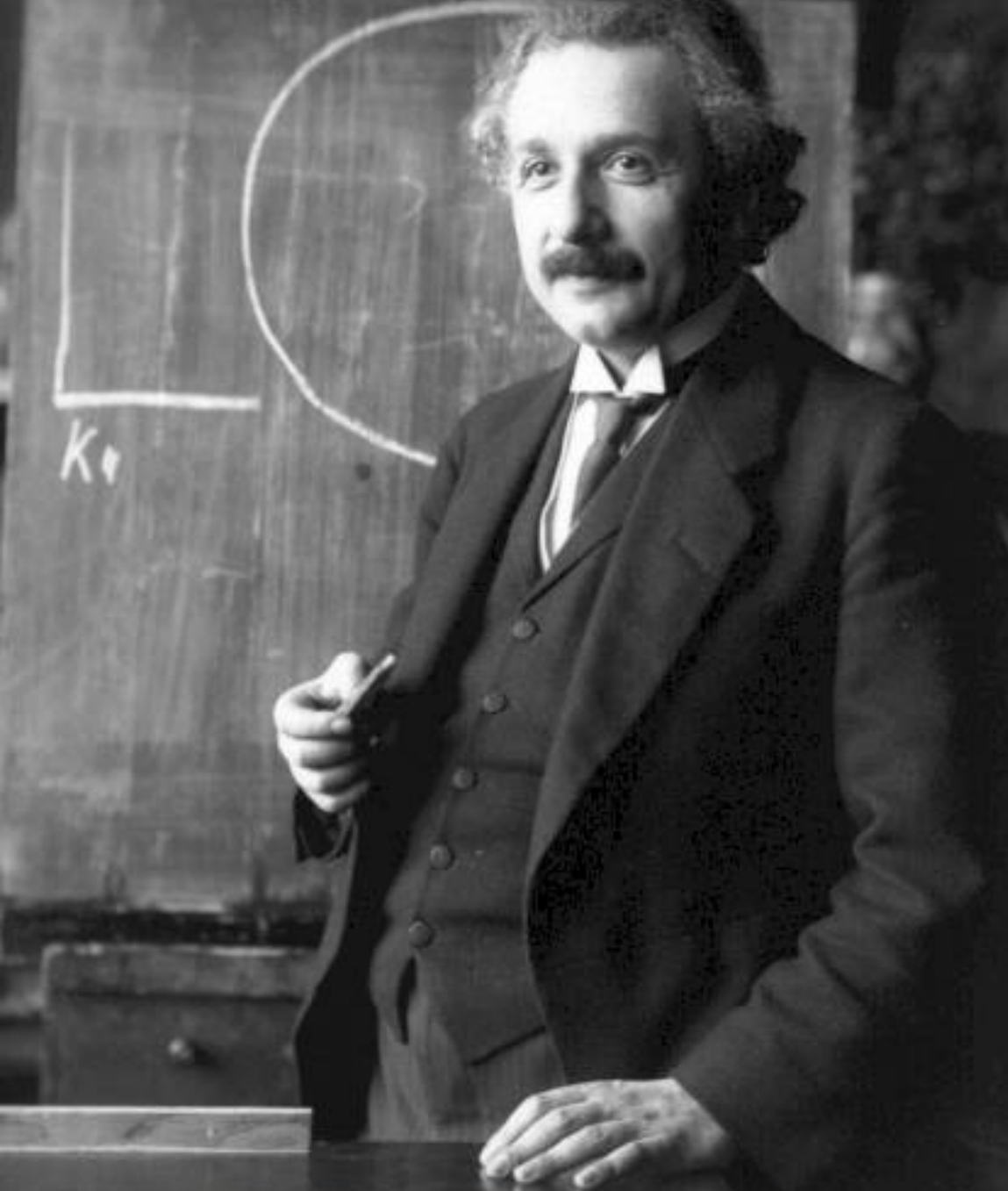


Relatividad Especial sin fórmulas



Pedro Gómez - Esteban González

Una introducción razonada a la Teoría Especial de la Relatividad de Albert Einstein. En unas cien páginas intenta hacer comprensible al lego, sin utilizar fórmulas matemáticas, las bases de la relatividad einsteniana partiendo de los dos postulados establecidos por el alemán en 1905.

Después de establecer un breve contexto histórico, el libro deduce de manera razonada las consecuencias más importantes de la relatividad especial: la relatividad de la simultaneidad, la dilatación del tiempo, la contracción de la longitud, el aumento de masa y la adición relativista de velocidades.

En una segunda parte del libro se destripan las dos paradojas relativistas más importantes, la del palo y el granero (o del corredor) y la paradoja de los gemelos. Finalmente, se recorren las confirmaciones experimentales más contundentes sobre la relatividad especial.

Ésta serie intenta, a lo largo de sus diez artículos, servir de introducción razonada a la Teoría Especial de la Relatividad de Albert Einstein. Sin utilizar fórmulas, trata de mostrar cómo a partir de los dos supuestos de Einstein, toda su teoría aparece como consecuencia lógica e inevitable.

Preludio

En la entrada del «pozo intuitivo», manolo me pide que explique por qué no se puede ir más rápido que la velocidad de la luz. Le he estado dedicando tiempo a pensar cómo hacerlo sin usar fórmulas y sin dar cosas por sentado, para que no sea simplemente «pues porque esta ecuación dice que haría falta una energía infinita», que es lo que suelo leer por ahí... y no puedo hacerlo. Al menos, no sin establecer unas bases antes.

De manera que, al final, he decidido «tirar por el camino de enmedio» y dedicar una serie entera de *Ahora que lo pienso...* a la *Teoría de la Relatividad Especial*, y de paso contestar a la pregunta de manolo. Eso sí, siendo esto *El Tamiz* vamos a intentar no utilizar fórmulas sino hablar de las cosas cualitativamente. Mi objetivo es explicar que todas las «cosas raras» que parecen pasar cuando vas muy rápido (la dilatación del tiempo, contracción de la longitud, etc.) son consecuencias muy lógicas e inevitables de un punto de partida muy sencillo.

Es posible que esta serie entera te parezca un rollo insoportable: lo siento, pero si quieres respuestas tendrás que tener paciencia conmigo, porque quiero ir poco a poco. Todos los artículos de esta serie van a tener «*Relatividad sin fórmulas*» en el título, de modo que puedes saltártelos y punto final. Por supuesto, el aviso obligatorio de *El Tamiz*: esto no es un análisis exhaustivo de la relatividad y vamos a realizar simplificaciones que pondrán a cualquier físico de-

cente los pelos de punta. Simplificaciones tremendas... y lo peor es que *nos gusta así*.

En esta primera entrega de la serie, vamos a hablar de cuál es la situación de la física relativa a la luz y el movimiento en 1905, cuando Einstein publica su genial *Teoría de la Relatividad Especial*.

A finales del siglo XIX, las leyes que regulan el movimiento de los objetos materiales estaban muy establecidas. Uno de los principios más importantes, el *Principio de Relatividad de Galileo*, afirmaba que no hay forma de saber si un sistema está quieto o se mueve a velocidad constante. Esto tiene sentido: imagina que tú y un amigo os movéis por el vacío, el uno hacia el otro a velocidad constante. Tú pensarías que estás quieto y que él se mueve hacia ti. Él pensaría que está quieto y que tú te mueves hacia él. No hay ningún experimento que ninguno de los dos pueda hacer para demostrar que tiene razón. ¿Quién está quieto y quién se mueve? No hay manera de saberlo.

Pero este principio no se aplicaba a las ondas. De acuerdo con las teorías de la época, *sí* se podía saber quién se mueve o quién está quieto, porque las ondas electromagnéticas, como la luz, se mueven a una velocidad conocida en el vacío: 300 000 km/s. El que mida que la velocidad de la luz es 300 000 km/s, es el que está quieto. El que no mida esa velocidad, se mueve. De manera que, hacia 1900, el *Principio de Relatividad* (también llamado *Principio de Equivalencia*) sólo se aplicaba al movimiento de objetos, pero no a la luz.

A estas alturas, los físicos estaban de acuerdo en que la luz era una onda. Sin embargo, todas las otras ondas conocidas hasta entonces, como por ejemplo el sonido, necesitaban de un medio por el que propagarse (como el agua, una cuerda o el aire). ¿Por dónde se propagaba entonces la luz? ¿Cómo nos llega, por ejemplo, desde el Sol, si no hay nada entre nosotros? (Hoy en día sabemos que no hay ne-

cesidad de un medio de propagación, pero entonces se pensaba que sí era necesario).

Una posibilidad es que entre nosotros sí haya algo. Es posible que la Tierra no se mueva por el vacío, sino que haya un medio que llena todo el Universo y en el interior del cual se mueven los astros. Los científicos que propusieron su existencia lo llamaron *éter luminífero*. La luz que sale del Sol nos llega a través del éter, con lo que el problema queda resuelto. Además, puesto que el éter está quieto (es el «sistema de referencia absoluto» del Universo), la luz se mueve a 300 000 km/s respecto a él, y las teorías del electromagnetismo de la época (sintetizadas en las ecuaciones de Maxwell) se cumplían perfectamente.

Pero los científicos no dejan las cosas estar, es lo que tienen: siempre hacen preguntas. Por ejemplo, ¿no debería la Tierra, al moverse dentro del éter como un barco en el agua, rozar con él y frenarse? Además, todas las demás ondas, como el sonido, se propagan más deprisa cuanto más denso es el material por el que se mueven, y la luz es la onda más rápida de todas... ¿no debería el éter ser muy denso? ¿Cómo podemos entonces movernos a través de él sin notarlo?

Sin embargo, al no haber otra explicación posible, muchos físicos aceptaban la existencia del éter, que sólo tenía sentido si se consideraba que tenía propiedades muy raras: era extraordinariamente tenue e invisible, de modo que ni lo notamos ni rozamos contra él, y todas las estrellas y planetas se mueven a través de él sin alterar su camino. La luz lo utiliza como medio de propagación, de modo que puede viajar por el aparente vacío.

Por supuesto, en seguida surgió la pregunta: si el éter está quieto pero la Tierra se mueve a través de él, ¿cómo de rápido nos movemos? Saberlo no sería difícil. Imagina la siguiente situación: te mueves a través del éter por el vacío interestelar, pero no sabes cómo de rápido. Lo único que

sabes es que la luz se propaga por él siempre a 300 000 km/s. ¿Cómo podrías saber tu velocidad?

Fácil: podrías coger una linterna y apuntar en una dirección determinada, y medir la velocidad de la luz de la linterna. Luego elegir otra dirección y medir la velocidad de la luz. Y la luz se movería más rápido en unas direcciones que en otras, *porque se mueve a 300 000 km/s respecto al éter y tú te mueves respecto a él en una dirección.*

Por ejemplo, imaginemos que te mueves a 1000 km/s en el éter. Si apuntaras la linterna hacia «delante» en tu movimiento, estarías persiguiendo a la luz que sale de la linterna, de modo que su velocidad respecto a ti sería 299 000 km/s. Si apuntaras la linterna hacia atrás, te estarías escapando de la luz, de modo que se movería respecto a ti a una velocidad de 301 000 km/s.

De manera que los físicos hicieron justo eso: medir la velocidad de la luz en diferentes direcciones para saber cómo de rápido nos movemos en el éter. El experimento más famoso, por su extraordinaria precisión y simpleza, fue el de Albert Michelson y Edward Morley (aunque no vamos a detallarlo aquí, se basa más o menos en el razonamiento que hemos hecho antes).

Michelson y Morley midieron la velocidad de la luz con una precisión inmensa en muchas direcciones diferentes, y el resultado que obtuvieron fue concluyente: **la velocidad de la luz era exactamente la misma en todas direcciones.** En otras palabras, de acuerdo con las suposiciones de la época, la Tierra estaba totalmente quieta en el éter.

De hecho, hubo gente que pensó que tal vez diera la casualidad de que en ese momento la Tierra realmente estuviera quieta en ese punto de la órbita alrededor del Sol. De manera que se repitió el experimento seis meses después (cuando la Tierra se está moviendo en sentido contrario alrededor del Sol). El resultado: la velocidad de la luz era exactamente la misma en todas direcciones. ¡Pero si se

había medido en momentos diferentes y en direcciones diferentes! ¿No debería notarse la diferencia?

En ese momento, en el que por un lado el *Principio de Relatividad de Galileo* era aceptado para las partículas pero no las ondas, de modo que teóricamente mediante la luz podríamos saber a qué velocidad nos movemos, y por otro lado la velocidad de la luz parecía ser siempre la misma de manera que debíamos estar quietos todo el tiempo a pesar de movernos alrededor del Sol... algo no encajaba.

Aquí, por supuesto, entra Einstein y rompe la física anterior en mil pedazos. Pero eso lo discutiremos en el segundo capítulo de esta serie, en el que analizaremos los postulados de los que parte el genial físico para establecer su teoría y empezaremos, finalmente, a zambullirnos en las procelosas aguas de... bueno, no: la verdad es que las aguas de la Relatividad Especial no son nada procelosas, y espero que cuando acabe esta serie estés de acuerdo conmigo.

Gracias por la paciencia de leer esta entrada tan larga, pero era necesario saber de dónde partimos cuando empezemos con el *heavy metal* de la contracción de la longitud y cosas así, y para comprender lo revolucionario de la teoría de Einstein.

Los Postulados

En la *primera entrada* de esta serie acerca de la *Teoría Especial de la Relatividad* hablamos acerca de la situación de la física referente al movimiento y las ondas a principios del siglo XX. En este segundo artículo vamos a seguir avanzando poco a poco, sentando las bases para más adelante extraer conclusiones: hablaremos sobre los dos postulados en los que Einstein basa su teoría.

Los avisos oportunos: *El Tamiz* sigue el lema de *Antes simplista que incomprendible*, de modo que si quieres exactitud y corrección extremas, mejor vas a otro sitio. En segundo lugar, esta serie tarda cierto tiempo en llegar a «lo divertido» de la relatividad (creo que lo empezaremos en la siguiente entrega), pero tienes que tener paciencia y entender bien las bases antes de llegar a lo más enjundioso de la teoría.

Dicho esto, hoy simplemente vamos a dejar bien claros los dos postulados que establece Einstein para desarrollar su Teoría Especial. Son muy sencillos y, al principio, puede parecer que no tan diferentes de los de la física clásica, pero revolucionarían nuestro conocimiento del Universo:

- 1. Todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes.**
- 2. La velocidad de la luz en el vacío es siempre la misma, independientemente de quién la emita y quién la mida.**

La grandeza de la *TRE* es la cantidad ingente de información que extrae de estos simples postulados. Puede parecer increíble, pero la equivalencia entre masa y energía, la dilatación del tiempo, la contracción de las longitudes... todo se deduce de manera relativamente sencilla de estas dos simples premisas.

Ahí está el verdadero genio de Einstein —sin un laboratorio ni complicados aparatos, simplemente con un lápiz, un papel y su cerebro, fue capaz de realizar predicciones que parecían una locura, como que un reloj que se moviera muy rápido marcaría las horas más despacio... y, una tras otra, todas se han verificado experimentalmente. Y todo a partir de esos dos postulados.

¿Qué quieren realmente decir?

El primero, si recuerdas la anterior entrada de esta serie, es prácticamente el de Galileo —sólo que Einstein lo hace absoluto: *No hay manera posible de saber, con ningún experimento físico, si te estás moviendo a velocidad constante o bien estás quieto* (eso es lo que es un «sistema de referencia inercial»).

A lo largo de esta serie vamos a realizar una serie de «experimentos mentales» para pensar acerca del Universo. En ellos voy a utilizar dos personajes, Ana y Alberto, que se encuentran en el vacío del espacio, lejos de cualquier objeto, solos en el espacio interestelar —veremos qué conclusiones extraen Alberto y Ana de lo que observan.

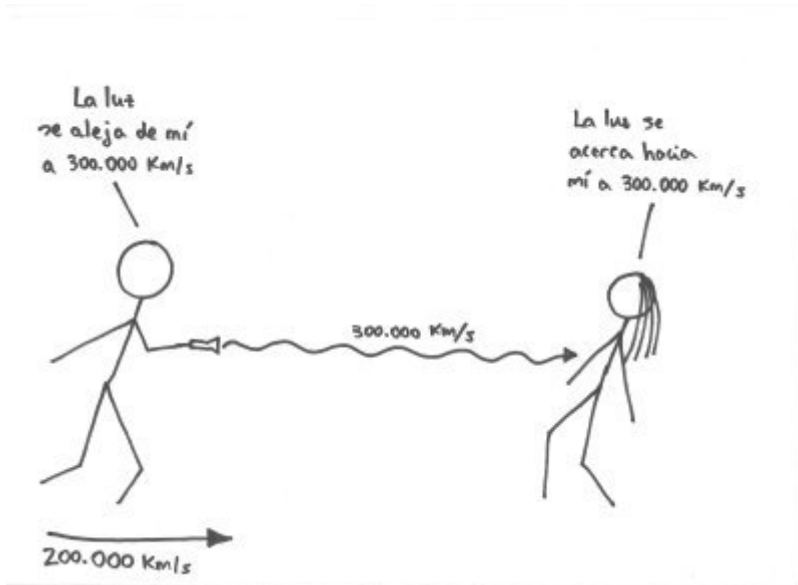
Lo que dice el primer postulado, en términos de «Ana y Alberto» es lo siguiente: Si Ana y Alberto notan que se mueven el uno respecto al otro, **es absolutamente imposible que sepan si uno está parado y el otro no, o los dos se mueven**. No sólo eso, la pregunta de si «uno está parado o se mueve con velocidad constante» *no tiene ningún sentido*, porque no hay un punto fijo y en reposo que esté «parado» de manera absoluta.

De manera que todas las leyes físicas y los experimentos que Ana o Alberto puedan realizar deben ser consistentes

tes con esto: no puede haber ningún experimento que Alberto realice, por ejemplo, y le haga decir, «¡Anda! Si pasa esto, quiere decir que no estoy parado». Lo que sí puede observar es que se mueve respecto a Ana —pero no puede ir más allá en su razonamiento.

El segundo postulado dice que si Ana o Alberto miden la velocidad de la luz, independientemente de su origen y de cómo se mueve cada uno, el resultado en el vacío va a ser siempre, segurísimo, 300 000 km/s. Éste postulado, en sí mismo, ya hace chirriar nuestra intuición. Piénsalo:

Si Alberto se mueve por el espacio hacia Ana a 200 000 km/s y apunta una linterna hacia ella, Alberto ve la luz alejarse de él a 300 000 km/s. Y Ana ve la luz acercarse a ella a 300 000 km/s. ¿Te das cuenta de lo raro que es, y de cómo extraeremos conclusiones muy anti-intuitivas de esta simple premisa? Imaginarse esa situación ya contradice nuestra intuición y nuestro cerebro (al menos el mío) ya suelta una alarma, «¡Paradoja! ¡Eso no tiene sentido!».



Ana y Alberto experimentan la relatividad. No, no la está matando con la linterna.

Por cierto, si has entendido el primer postulado y te pregunto: *¿Cuál de los dos tiene razón? ¿Alberto o Ana?*, seguramente contestarás de manera correcta —los dos tienen «razón», y la pregunta no tiene sentido.

Ésta es una de las «revoluciones» de la teoría einsteniana respecto a las anteriores. De Einstein en adelante (mucho más aún con la cuántica, pero el punto de ruptura está aquí), la pregunta *«¿Qué está pasando realmente?»* carece de sentido. *«¿Qué observa Ana?»* tiene sentido, como lo tiene *«¿Qué observa Alberto?»* pero deja de ser posible hacer preguntas absolutas: la realidad se convierte en la observación por parte de alguien, y sin ese alguien no podemos hablar de realidad: la realidad es local para cada observador.

¿Por qué en nuestra vida cotidiana parece que hay una sola realidad y todos vemos las cosas igual? Porque la diferencia entre lo que percibimos unos y otros es tan pequeña (porque nuestra velocidad relativa de unos respecto a otros es tan minúscula) que vemos «casi lo mismo», y a ese «casi lo mismo» que observamos lo llamamos «realidad»... pero no hay tal cosa. Raro, ¿verdad?

En la *próxima entrada* atacaremos ya la primera de las conclusiones inmediatas de los postulados de Einstein —la llamada «dilatación del tiempo». Sin embargo, te recomiendo que releas esto un par de veces para «empaparte» de los postulados, para que cuando empecemos a extraer conclusiones tengas el punto de partida muy claro. Por supuesto, si tienes alguna duda no tengas problema en mandarnos un correo o escribir un comentario aquí.

Dilatación del Tiempo

Después de hablar de la *situación de la física* del movimiento y las ondas a principios del siglo XX y de los *postulados de Einstein*, en esta tercera entrada de la serie *Relatividad sin fórmulas* empezaremos a extraer conclusiones de los postulados. Si no has leído los artículos anteriores de la serie, te recomiendo encarecidamente que lo hagas o éste (y los posteriores) pueden resultarte incomprensibles. Además, no vamos a repetir las advertencias acerca del contenido de esta serie aquí —lee los artículos anteriores para saber qué esperar y qué no esperar de esta serie de entradas.

Hoy vamos a centrarnos en una consecuencia inmediata de los postulados de Einstein: lo que suele llamarse «*dilatación del tiempo*». Para ello, vamos a realizar un experimento mental en el que, por supuesto, van a participar Ana y Alberto, nuestros «observadores relativistas» ficticios.

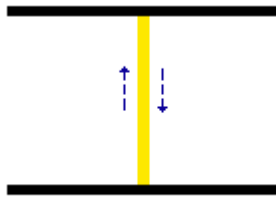
Supongamos que Ana y Alberto se encuentran en el vacío del espacio, lejos de cualquier otro objeto, y que se mueven uno respecto al otro a velocidad constante. De acuerdo con los postulados que enunciamos en la entrada anterior, no tiene sentido preguntar si el que se mueve es Alberto y Ana está parada o es al revés. Simplemente, se mueven uno respecto al otro.

Por cierto, ten en cuenta una cosa: en la realidad, muchos sistemas de referencia no son inerciales (no se mueven a velocidad constante o están en reposo), de modo que sí se sabe quién se mueve. Si, por ejemplo, Ana empieza a

acelerar hasta que se mueve a determinada velocidad respecto a Alberto, que nunca ha acelerado, lo que decimos sería cierto, pero entonces los dos sabrían que el que «tiene razón» es Alberto, pues es Ana la que ha empezado a moverse. El «no saber quién se mueve y quién no» sólo sirve si los dos sistemas son inerciales.

Lo que vamos a demostrar con este experimento mental es que, si aceptamos los dos postulados de Einstein, inevitable y lógicamente se deduce que Ana y Alberto no miden el tiempo igual.

En nuestro experimento, Ana tiene un reloj que funciona de la siguiente manera: consta de dos espejos paralelos separados una distancia determinada, y un rayo de luz que rebota de espejo en espejo indefinidamente. Cada vez que el rayo rebota en un espejo es un «tic» del reloj. Esto es lo que hace el reloj en el sistema de referencia de Ana:



Y puesto que la luz va a 300 000 km/s y la distancia entre los espejos es fija, todos los «tics» tardan el mismo tiempo. Pongamos que el rayo de luz recorre el espacio entre los espejos en 1 segundo. Entonces, los «tics» del reloj se repiten cada segundo.

Pero ahora fijémonos en lo que observa Alberto en su sistema de referencia. Para él, Ana se está moviendo. Supongamos que Alberto observa lo que le ocurre a Ana cuando ésta pasa justo delante de él, de modo que él la ve moverse «de izquierda a derecha». Lo que ve Alberto que

hace el rayo de luz en el reloj no es lo mismo que ve Ana, pues los espejos se mueven. Alberto ve esto:



Y aquí está el núcleo del asunto —si entiendes lo que voy a decir, entiendes lo básico de la Teoría de la Relatividad Especial. Alberto ve que el rayo de luz *recorre una distancia más grande* que la que separa los espejos. Con lo cual sólo hay dos posibilidades: o el rayo viaja más rápido, o tarda más tiempo. Pero el rayo no puede ir más rápido: el segundo postulado dice que siempre va exactamente a 300 000 km/s... de modo que es inevitable: **el rayo tarda más en ir de espejo a espejo.**

Piensa sobre las consecuencias de este hecho: si el rayo tarda más en rebotar de espejo a espejo, en el sistema de referencia de Alberto, el reloj de Ana no hace «tic» cada segundo: va más lento.

Pero no es sólo el reloj —el reloj mide el tiempo... el tiempo de Ana, visto desde Alberto, está yendo más despacio: se «dilata». Puedes pensar que otros relojes que no utilizasen la luz siguieran al mismo ritmo de antes, pero entonces, ¿habría cosas que Alberto vería moverse a velocidad normal y otras no? Si, por ejemplo, Alberto y Ana se ponen de acuerdo para que Ana toque su nariz cada vez que el reloj hace «tic», ¿vería Alberto a Ana tocarse la nariz sin que el reloj hiciera «tic»?

Puedes verlo de otra manera: las interacciones entre las partículas que constituyen a Ana se producen a la velocidad de la luz. Si el tiempo del reloj va más lento porque la luz debe recorrer más distancia, *lo mismo ocurre con todas*

las demás interacciones que se producen, es decir, no sólo el reloj, sino todo lo demás va más lento, incluida Ana y, por ejemplo, los latidos de su corazón.

Por supuesto, si Alberto tuviera un reloj igual que hace «tic» cada segundo en su sistema de referencia, Ana observaría que el reloj de Alberto hace «tic» más lento... y Alberto observaría que es el de Ana el que va más lento. ¿Quién tiene razón? Los dos... cada uno en su propio sistema de referencia. Como hemos dicho antes, si en un momento dado están quietos el uno respecto al otro y uno de ellos empieza a acelerar, el problema ya no es «simétrico».

Aunque no vamos a utilizar fórmulas, es fácil entender que, cuanto más rápido se mueva el otro sistema, más lento te parece a ti que pasa el tiempo para él, porque más distancia recorrería el rayo dentro del reloj. De hecho, piensa en el caso extremo: si Ana se estuviera moviendo a la velocidad de la luz... ¡el rayo del reloj nunca jamás podría alcanzar la otra pared! La pared se estaría moviendo a la misma velocidad que el rayo, *de modo que el «tic» no se produciría jamás*.

Si ocurriera esto, Alberto vería a Ana «congelada» en el tiempo: su corazón no latiría, el reloj no mediría el paso de un solo segundo... el tiempo se habría parado, para Ana, vista desde el sistema de referencia de Alberto. Esto es lo que le pasa a los fotones (las partículas que componen las radiaciones electromagnéticas como la luz): como se mueven a 300 000 km/s, vistas desde nuestro sistema de referencia no cambian jamás... el tiempo no pasa para ellos.

Pero al tiempo le suceden más cosas raras debido a la relatividad... por ejemplo, las cosas que suceden a la vez en un sistema de referencia pueden no ser simultáneas en otros. Éste aspecto será el que exploremos en la siguiente entrega de esta serie, *Relatividad de la Simultaneidad*.