

LA RELATIVIDAD Y LAS PARADOJAS

Comentarios dirigidos al autor del sitio
<http://www.geocities.com/newmodel2k/>

Contenido

¿Qué es realmente una paradoja?

Algunos conceptos relativistas

El viajero sin retorno

¿Contiene realmente paradojas el viaje "sólo de ida"? Nueva edición del diálogo entre OG1 y OG4

El experimento recíproco

La verdadera paradoja de los gemelos

Limpiando paradojas de debajo de la alfombra

Los movimientos rotatorios

Un ejemplo real: los mesones relativistas

¿Son realmente necesarios los MRLE?

¿Tiene lógica la relatividad especial?

La increíble historia de la Varilla Mágica

Una cuestión de principios

Los sistemas comóviles

¿Qué es realmente una paradoja?

Trataré de dilucidar en primer lugar el significado de la palabra "paradoja"; no desde el punto de vista de la lógica, sino en el sentido en que se suele usar hablando de la relatividad. Esta palabra se usa, al menos, en los tres sentidos siguientes:

a) Paradoja aparente: se trata de una argumentación, idea, hecho, etc., que aparenta ser una contradicción pero que, examinada más a fondo, no lo es.

b) Paradoja-extrañeza: se trata de un fenómeno, teoría, etc., que se aparta de nuestra experiencia cotidiana, del sentido común popular, pero que tampoco comporta contradicciones.

c) Paradoja-contradicción: sería una verdadera contradicción. Una teoría sería verdaderamente paradójica (en este sentido: contradictoria), si llevara verdaderamente a contradicciones, es decir, a la conclusión, a la vez, de A y de no A. Una teoría así sí que atentaría gravemente contra la lógica, y habría que desecharla de inmediato.

Aunque hace tiempo que estudié mis textos sobre RE y necesito realmente un recordatorio-actualización (pido disculpas por los inevitables errores en que caeré), trataré de argumentar que la RE contiene paradojas aparentes (todos los que hemos leído algo sobre ella hemos topado y discutido sobre la famosa "paradoja de los gemelos"); que la RE contiene extrañezas (no más que otras teorías físicas clásicas o modernas), pero, desde luego, hasta donde yo soy capaz de ver, la RE no contiene contradicciones (si las tuviera, habrían sido puestas inmediatamente de manifiesto por la comunidad científica y habría sido rechazada y substituida hace mucho tiempo).

En cambio, trataré de argumentar que, en tu exposición, donde tú ves paradojas (en el sentido de contradicciones) o atentados contra la lógica no hay más que paradojas aparentes (es decir, no una contradicción), y que por el contrario en tu intento de solucionar las falsas paradojas mediante tu teoría de marcos de referencia localmente estacionarios (MRLE), no se llega propiamente a una contradicción pero sí que se puede afirmar que tu teoría contiene extrañezas más fuertes que las de la RE y es, en mi opinión, innecesaria y conceptualmente inadecuada.

Algunos conceptos relativistas

Para ver si hay o no contradicciones en la RE, creo que será conveniente recordar algunos conceptos, como el de "sistema propio" de un objeto o de un proceso, el de "duración propia" de un proceso y el de "longitud propia" de un objeto. Llamaremos "sistema propio" de un proceso (el lapso de tiempo que pasa entre dos acontecimientos, el "inicio" y el "final") al sistema de

referencia en el cual todo el proceso ocurre en el mismo punto del sistema; como en RE solemos tratar con movimientos rectilíneos y uniformes, podemos decir también que en ese caso el sistema propio es aquél en que el inicio y el final del proceso son copuntuales, es decir, ocurren en el mismo punto del sistema. La duración del proceso (que se puede medir directamente mediante un reloj en reposo en el punto de inicio y final) en este sistema de referencia propio se llama "duración propia". Según la RE, en cualquier sistema de referencia que se mueva respecto al sistema propio, la duración observada de ese mismo proceso será mayor que en el sistema propio; esta duración, medida indirectamente (mediante la sincronización adecuada de dos o más relojes distintos) se llama "duración impropia". Debe quedar claro que hay un conjunto infinito de sistemas de referencia que pueden ser propios de un proceso; pero todos ellos tienen sus respectivos orígenes no coincidentes en reposo relativo unos respecto a los otros; sólo así los acontecimientos "inicio del proceso" y "final del proceso" pueden ser copuntuales en todos estos sistemas (los ejes de estos sistemas, además, no giran). Pero como todos estos sistemas (observadores) están en reposo relativo, podemos simplificar el vocabulario, elegir un único punto como origen y hablar de un solo sistema propio, con múltiples observadores en reposo relativo. Todos los demás sistemas de referencia o observadores que se muevan respecto al sistema propio (o respecto a los sistemas propios en general) no son sistema propio. Y recordemos: la duración propia de un proceso es siempre menor que la duración impropia.

Igualmente, llamaremos "sistema propio" de un objeto rígido (algo que tiene unas dimensiones determinadas, concretamente una distancia entre sus dos puntos extremos; por ejemplo, una varilla) al sistema de referencia en el cual ambos extremos están en reposo. La longitud del objeto (que se puede medir directamente mediante procedimientos de agrimensura, o bien enviando señales de luz de ida y vuelta) en este sistema de referencia propio del objeto se llama "longitud propia". También, según la RE, en cualquier sistema de referencia que se mueva respecto al sistema propio, la longitud observada de ese mismo objeto será menor que en el sistema propio; esta longitud, medida indirectamente (mediante observaciones simultáneas a distancia de ambos extremos del objeto) se llama "longitud impropia". Igualmente aclararemos que hay un conjunto infinito de sistemas de referencia que pueden ser propios de un objeto; todos ellos con sus respectivos orígenes no coincidentes en reposo relativo unos respecto a los otros, y con los respectivos ejes sin girar; en todos estos sistemas los extremos del objeto estarán en reposo, y podemos simplificar también considerando un único sistema con múltiples observadores en reposo relativo. La longitud propia de un proceso es siempre mayor que la longitud impropia.

Las duraciones y las longitudes propias e impropias se relacionan entre sí mediante las conocidas fórmulas, que se deducen inmediatamente de las transformaciones de Lorentz: $T = T' / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, $L = L' \cdot (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, donde T , L son la duración y la longitud impropia, T' , L' son la duración y la longitud propia, v es la velocidad relativa de los sistemas y c es la velocidad de la luz (v ., por ejemplo, Física, M. Alonso - E. Finn, ec. 19.15 y 19.16, p. 413-414, o de la edición antigua en tres volúmenes, que a mí me gusta más, ec. 6.40, 6.41, vol. I, p. 144-145). Estos conceptos pueden recibir nombres diversos según los libros, pero la esencia es la misma, y en este trabajo yo me referiré a ellos siempre con estos nombres. Podríamos prescindir de ellos, pero entonces estaríamos obligados a tratar sólo con acontecimientos puntuales e instantáneos y posiciones y momentos relativos, y a aplicar directamente las transformaciones de Lorentz con sumo cuidado para ver a qué llamamos x , x' , t y t' en cada caso (según como definiésemos los sistemas de referencia) calculando las longitudes y las duraciones por diferencias. Si en alguna de mis argumentaciones no estás convencido de mi cálculo, te invito a que lo hagas así. Simplemente, los conceptos de longitud propia e impropia y duración propia e impropia simplifican los cálculos y facilitan los razonamientos.

Por ejemplo, la distancia entre Valencia y Madrid, 350 Km, es una longitud propia en el sistema de referencia ligado a la Tierra (o en todos los sistemas con orígenes distintos pero en reposo respecto a la Tierra). En este sistema, la Tierra está inmóvil; es un sistema que gira y se mueve solidario a la Tierra, alrededor de sí misma y alrededor del Sol, etc. Sólo en este sistema la carretera Valencia - Madrid sería un objeto en reposo relativo, una varilla inmóvil (suponiendo que fuera recta) con sus extremos inmóviles, luego éste es su sistema propio y 350 Km es la longitud propia de la carretera. Cualquier otro observador que se mueva respecto a la Tierra, por ejemplo, en un avión superevéliz que sobrevuele la carretera Valencia - Madrid de modo que ésta quede paralela a su movimiento, si mide con precisión, medirá la distancia Valencia - Madrid como más corta; por ejemplo, si se mueve en línea recta a $0,866 c$ respecto a la Tierra, la medirá

como de 175 Km; pero este observador sabe que se mueve respecto a la Tierra, sabe que ha medido una longitud impropia, y si aplica la RE podrá calcular la longitud propia Valencia - Madrid como de 350 Km, longitud que coincidirá con la que hemos medido por agrimensura. No hay, pues ninguna contradicción.

Igualmente, el tiempo que yo tardo en comerme una paella, pongamos 1 hora, es el mismo tanto si estoy sentado en el comedor de mi casa como si me aceleran en un cohete supersónico. Este proceso tiene también un sistema propio, que es aquél en que mis manos, mi boca y mi estómago se encuentran en reposo relativo (excepto pequeños movimientos locales necesarios para comer) durante toda la comida; es decir, un sistema ligado a mí (o cualquier otro sistema con origen distinto, pero que se mueva y gire o no como yo); en este sistema, el comienzo y el fin de la comida son copuntuales, ocurren en el mismo punto, y la duración de la comida, 1 hora, es una duración propia. Cualquier otro observador hará una medición distinta; por ejemplo, el del superavión del párrafo anterior la medirá como de 2 horas (duración impropia); pero de nuevo sabrá aplicar la RE y deducir que la duración propia de la comida fue de 1 hora, duración que coincide con lo que yo mido con el reloj de mi muñeca (en reposo respecto a mí). De nuevo no hay ninguna contradicción.

Como estamos centrándonos en la RE, hablaremos sobre todo de movimientos relativos respecto a sistemas inerciales en movimiento rectilíneo y uniforme, pero los conceptos de duración y longitud propia se aplican, con la ayuda de la relatividad general, a cualquier tipo de movimientos.

Desde luego, los observadores de un sistema de referencia A observan que los procesos de otro sistema B que se mueve respecto a A son más lentos, y los objetos son más cortos. Como todos los sistemas son equivalentes, los observadores de B verán también que los procesos de A son más lentos y los objetos de A más cortos que los suyos. ¿Hay aquí alguna paradoja-contradicción? La habría, efectivamente, si hubiera objetos o procesos que tuvieran como propios ambos sistemas A y B. En efecto, tomemos uno de estos objetos fantasma M que es propio tanto de A como de B: como M es propio de B, si en B mide, por ejemplo, 1 metro, en A observarán que mide, supongamos, 50 cm.; pero M, que mide 50 cm en A, también es propio de A, luego los observadores de B lo deben medir más corto que los de A; digamos 25 cm; es decir, M mide en B 1 m y M mide en A 25 cm; esto es una contradicción, y la teoría que afirmara esto debería ser inmediatamente rechazada. Pero sabemos que esto no es así, y la RE no dice nada de eso: un objeto (o un proceso) no puede ser propio de dos sistemas de referencia en movimiento relativo; sólo en uno de ellos estará en reposo relativo, y éste será su "sistema propio"; en éste mediremos su longitud propia (o su duración propia, si es un proceso), calcularemos mediante las fórmulas de la RE su longitud (o duración) impropia en los demás sistemas y comprobaremos si las medidas de las longitudes (o duraciones) impropias coinciden o no con el cálculo. En el ejemplo que he puesto, tomemos un objeto real M1 en reposo en el sistema B (por ejemplo, una mesa) que mide un metro (longitud propia); si el sistema A se mueve respecto a B, los observadores de A medirán esa mesa como de 50 cm (longitud impropia); pero saben que esa mesa no está en reposo en A, sino en B, que se mueve respecto a A, y podrán calcular que su longitud propia es realmente de 1 m, que es lo que midieron los observadores de B. Veamos ahora otra mesa M2 idéntica a M1, pero que está en reposo relativo en el sistema A (repito, es una mesa idéntica a la otra, quizá la construyó el mismo carpintero, pero no es la misma mesa: M1 está en reposo relativo en el sistema B, mientras que M2 está en reposo en el sistema A; son mesas idénticas, pero distintas; hasta podría ser la misma mesa que la hemos sacado del sistema B y la hemos colocado en reposo en el sistema A, pero en todo caso se trata de otro experimento distinto del primero). Esta mesa M2 mide, en el sistema A, que le es propio, 1 m (longitud propia); los observadores de B la verán pasar a toda velocidad y la medirán como de 50 cm (longitud impropia), pero saben que se encuentra en movimiento respecto a B, y por lo tanto sabrán calcular su verdadera longitud propia como de 1 m, que es lo que miden realmente los de A. No hay pues, ninguna contradicción.

El viajero sin retorno

Partiré ahora del análisis que haces en tu página:

<http://www.geocities.com/newmodel2k/Lorentz1.htm>

Antes de nada, es necesario aclarar que estoy de acuerdo en que lo que tú llamas el "lío de los relojes" es consecuencia de las transformaciones de Lorentz; nada que objetar al respecto. El lío

de los relojes puede verse también como una consecuencia, o una ilustración, de la relatividad de la simultaneidad: lo que es simultáneo para el sistema A (el paso de todas las manecillas por la hora 0,00), no lo es para B, y por eso cada uno de los observadores situados en puntos distintos de B observan este paso a horas distintas de su propio tiempo. Ver esto es importante, pues nos ayudará a resolver alguna paradoja aparente más adelante.

En tu descripción, según la RE el reloj A1, originalmente en el sistema A, es acelerado hasta moverse solidario con el sistema B, y después de 20 segundos medidos en el sistema A se observa que para él han transcurrido sólo 10 segundos, es decir, menos tiempo que en el reloj A2 de A. Pero como, según la RE, ambos sistemas son equivalentes, y un gemelo observa que es el reloj del otro el que se retrasa, según tú, hay una paradoja-contradicción de la RE.

Hay que aclarar en seguida que este "experimento mental" no es equivalente al descrito comúnmente como "paradoja de los gemelos". El observador A2 no es realmente el gemelo de A1, porque está situado a una distancia no nula de la posición original de A1; es decir, A1 realiza un viaje sólo de ida, y compara su reloj con A2, que es otro observador en reposo relativo en el sistema A, pero distante, aunque su reloj esté sincronizado con todos los de A; desde luego que para el A1 viajero ha pasado menos tiempo que el transcurrido en el sistema A. Pero el verdadero gemelo de A1 no es el distante A2 (que podría ser un habitante de otro planeta), sino algún A1' que quedase fijo respecto al sistema A en la posición original de A1, en el extremo izquierdo de la varilla A (digo yo, si son gemelos, habrán nacido en el mismo sitio, no de lugares distantes, ¿no es así?; no olvidemos que la recta A, aunque tenga todos sus relojes sincronizados, puede ser tan larga como deseemos, y los relojes se han sincronizado mediante señales luminosas que tardan un tiempo no nulo en viajar). Para comparar la evolución del tiempo entre gemelos verdaderos y saber si la RE predice o no contradicciones reales sobre hechos observables en ese caso, A1 debería realizar el viaje de regreso (para hacerlo más sencillo, también con velocidad constante) desde la posición de A2 a la originaria de A1, y compararse con su gemelo A1' que ha permanecido sin viajar respecto al sistema A.

Veamos ahora con más detalle como analizan el viaje de A1 los observadores de cada sistema A y B, usando la RE, para ver si estos análisis son contradictorios o no. Recordemos que el viaje que según tú realiza A1 es sólo de ida, desde su posición original hasta la posición original de A2, distante 17,32 seg-luz. Según los observadores del sistema A, la duración propia de los procesos fijos en el sistema B es menor que la duración impropia que ellos miden, y viceversa. ¿Hay alguna contradicción? Veamos.

Analicemos el viaje de A1 primeramente desde el sistema A (que, para fijar ideas, podemos llamar "vía"). El viajero A1, parte del extremo izquierdo de la vía, se acelera respecto a A hasta alcanzar casi instantáneamente la velocidad de B (que podríamos llamar "tren") respecto a A, realiza un viaje de ida hacia la posición de A2 y mide la duración del viaje con su propio reloj: para él han pasado 10 segundos. ¿Cuánto tiempo habrá pasado en el sistema A? El viaje de A1 es un proceso que comienza y acaba en el mismo punto B1 del sistema B, como se observa en tus dibujos, luego es un proceso propio del sistema B; la duración del viaje medida por los observadores de B (que coincide con la duración experimentada por A1, que incidentalmente se ha convertido en un observador más de B, ya que viaja en el tren, es decir, ligado a B) es una duración propia. Por tanto, la duración observada por los observadores de A (uno de los cuales es A2, que se encuentra en reposo en la vía) es una duración impropia, mayor que la duración propia experimentada por A1; teniendo en cuenta el factor de conversión adecuado para la velocidad elegida, aplicamos la RE y averiguamos que para A2 (y para los demás observadores de A fijos en la vía) el viaje ha durado 20 segundos. La distancia entre el punto de origen del viaje (extremo izquierdo de la vía) y el punto destino, A2, es de 17,32 seg-luz medidos en A. Veamos si espacio en A = velocidad del móvil x tiempo en A: $17,32 \text{ seg-luz} = 0,866 c \times 20 \text{ segundos}$; A1 avanza por la vía 17,32 seg-luz en 20 segundos, a 0,866 c; luego todo cuadra. Esto no debe extrañarnos, puesto que la duración del viaje de A1 en la vía, 20 segundos, la podían haber deducido los de A conociendo la distancia recorrida y la velocidad del tren. Pero lo que es notable es que la duración propia del viaje, calculada por los físicos de B, de 10 segundos, cuadrará también, como veremos enseguida, con las observaciones de B.

Veamos ahora el viaje de A1 analizado por los observadores de B (recordemos que, durante el viaje, A1 se ha convertido en uno de ellos, ya que viaja con ellos en el tren). A1 observa que, por su reloj (que coincide con los de B), el viaje desde su posición original hasta A2 (llamaremos

A1-A2 a esta distancia) ha durado 10 segundos, a una velocidad de $0,866 c$ respecto a la vía. Sin embargo, la distancia A1-A2 es de $17,32 \text{ seg-luz}$. ¿Cómo es esto posible? ¡Ha debido viajar más rápido que la luz! Parece que toda la teoría se derrumba. Pero no es así (paradoja aparente). Nos hemos olvidado de un pequeño pero importantísimo detalle: la distancia A1-A2 corresponde a un objeto (tramo de vía) fijo en el sistema A, con sus extremos inmóviles en él; es decir, la medida que de esta distancia realizan los observadores de A es una longitud propia; ellos la miden (por procedimientos de agrimensura, enviando señales luminosas, o como sea) y obtienen un resultado de $17,32 \text{ seg-luz}$. Sin embargo, para los observadores de B (incluido A1, mientras esté de viaje en el tren), este tramo de vía no se encuentra fijo, sino que se mueve respecto a B a una velocidad de $-0,866 c$ (el signo menos indica hacia la izquierda; da igual decir que B se mueve respecto a A a $0,866 c$ que decir que A se mueve respecto a B a $-0,866 c$; esto es la relatividad del movimiento, supongo que en ello estaremos de acuerdo, pero creo que es esencial para comprender la equivalencia entre los sistemas inerciales). Por tanto, la distancia A1-A2 que miden los observadores de B (y A1) es una longitud impropia. Como conocen la medida de A1-A2 en A (porque A1 la sabía) aplican la RE y obtienen que medida en el sistema B la distancia A1-A2 debe ser de $8,66 \text{ seg-luz}$. Ahora todo cuadra también: distancia A1-A2 en el sistema B = velocidad del móvil \times tiempo en B: $8,66 \text{ seg-luz} = 0,866 c \times 10 \text{ segundos}$; A1 avanza por la vía $8,66 \text{ seg-luz}$ (medidos en B) en 10 segundos (medidos en B), a $0,866 c$.

Vemos pues, que, en cuanto a hechos predecibles y observables, el análisis de los observadores de A es idéntico al de los observadores de B: A1 partirá de su posición inicial, se desplazará hacia la derecha de la vía a $0,866 c$, y en 20 segundos de la vía llegará a A2, que dista de la posición original $17,32 \text{ seg-luz}$. Los de B dirán que el viaje duró 10 segundos y el desplazamiento es sólo de $8,66 \text{ seg-luz}$, pero el resultado observable es el mismo: A1 llegará a tiempo a su cita con A2. No hay ninguna contradicción en las previsiones de la RE.

Ahora podríamos preguntarnos: ¿quién tiene razón en sus medidas de duración y de distancias, los de A o los de B? Pues, hombre, depende de lo que entendamos por razón: para la RE (y para mí) todos los observadores inerciales son equivalentes, no es posible hablar de duraciones ni de longitudes absolutas, sino siempre de medidas en este o en el otro sistema de referencia. Pero, si nos empeñamos en darle la razón a alguien (y aclaremos que esto no es un concepto físico), podemos observar los hechos con detalle y como jueces imparciales, juzgar. La distancia A1-A2 corresponde a un objeto fijo en A (un tramo de vía, como hemos dicho); luego la medida que hacen los de A es una longitud propia; sin embargo, los de B miden una longitud impropia; si te gusta así, daremos la razón en cuanto a la distancia a los de A. En cambio, A1 realiza su viaje inmóvil en su asiento del tren (el asiento que está junto a B1), luego la medida de la duración del viaje que hace A1 (y todos los de B) es una duración propia, mientras que los de A miden una duración impropia; daremos, en cuanto a la duración, la razón a los de B. Resultado, como Salomón damos la razón en un cuanto a la distancia a un sistema, y en cuanto a la duración al otro sistema; recordemos que el concepto físico bien definido, sin embargo, no es "razón", sino "duración propia" y "longitud propia".

¿Contiene realmente paradojas el viaje "sólo de ida"? Nueva edición del diálogo entre OG1 y OG4

Aquí podría haber acabado el análisis de este problema, pero no me quedé completamente satisfecho. No porque vea ningún problema en la RE, sino porque no estoy seguro de haberte convencido, o de haber llegado al fondo del problema, o de haberme explicado bien. Después de todo..., ¿porqué yo no veo paradojas, y tú sí? Hay alguna diferencia entre tu razonamiento y el mío en la que hay que profundizar. Yo creo que el problema está en tu afirmación: "... conforme a los desarrollos de la RE, durante todo el trayecto cada gemelo observa que es el otro gemelo el que tiene relojes más lentos que el suyo propio. Y como la RE le da igual credibilidad a las mediciones de ambos gemelos surge la famosa paradoja."

Creo que hay que examinar todo esto con más detalle. En realidad, no es exacto, o al menos es incompleto y ambiguo, decir, como se suele afirmar, que "cada uno ve que los relojes del otro retrasan", como se suele decir frecuentemente, o que "es el otro gemelo el que tiene relojes más lentos que el suyo propio", como tú dices. En realidad, según la RE, los dos observadores están de acuerdo en que los procesos copuntuales en un sistema de referencia duran menos tiempo medidos en ese sistema en que son copuntuales que medidos en cualquier otro sistema que se mueva respecto al primero. Esto es lo mismo que decir que la duración propia de un proceso es

menor que la duración impropia, que es lo que estoy repitiendo desde el principio. Pero como el proceso "las manecillas de un reloj dan una vuelta" es copuntual en el sistema de referencia en que ese reloj se encuentra en reposo, desde otro sistema que se mueva respecto al reloj verán que, si lo miden con sus propios relojes, esta "vuelta" dura más; por eso se suele decir que "cada uno ve que los relojes del otro retrasan". Pero, atención, ¿quién observa este retraso? Veamos: en el sistema B hay un reloj, en reposo en un punto de B que llamaremos M, cuyas manecillas dan una "vuelta" que dura una hora; desde el sistema A observan que esta vuelta dura dos horas; pero ¿quién y cómo se observan estas dos horas? Cuando la "vuelta de las agujas" comienza, el reloj, en el punto M de B, pasa enfrente de un punto P de A. Cuando la "vuelta de las agujas" acaba, el reloj, que continúa en el punto M de B, pasa enfrente de un punto Q de A. Las dos horas que miden en A se miden por comparación posterior entre dos relojes distantes situados en P y Q, que han sido previamente sincronizados mediante señales lumínicas. Por tanto, la hora medida en B corresponde a una duración propia, mientras que las dos horas medidas en A corresponden a una duración impropia. En B hay un solo reloj fijo un punto de B que se mueve respecto a A; en A hay dos relojes distintos y distantes que ven pasar sucesivamente el reloj de B. Por tanto, afirmar simplemente que "cada gemelo observa que es el otro gemelo el que tiene relojes más lentos que el suyo propio" o que "cada uno ve que los relojes del otro retrasan" es ambiguo, pues no se aclara en qué sistema el proceso que se mide es copuntual y se está midiendo una duración propia, y en cuál no. Y de una frase ambigua se puede deducir cualquier cosa.

Veamos ahora la segunda parte de tu frase: "Y como la RE le da igual credibilidad a las mediciones de ambos gemelos". Esto es cierto, pero, ojo, hay que entenderlo en su justo sentido: la RE afirma que todos los sistemas inerciales son equivalentes y que sus cálculos respectivos son igualmente buenos, pero para un experimento o problema concreto, no se pueden intercambiar alegremente los sistemas, sino que hay que saber en qué sistema el proceso es copuntual y en cuál no. En el ejemplo que he dado, el sistema B es el sistema en que el reloj observado está en reposo, y el A es el "otro" sistema. Desde luego, para la RE, tienen igual valor la hora medida por B que las dos horas medidas por A, pero esto no quiere decir que 1 hora = dos horas, sino que se tiene en cuenta que la hora de B está medida el reloj de B mediante la "vuelta de las agujas" (duración propia), mientras que las dos horas de A fueron medidas por comparación entre dos relojes distantes. Una vez elegidos los sistemas de referencia, el comportamiento de los diversos objetos no es idéntico respecto a los dos, y no debe extrañarnos que en cada sistema se obtengan duraciones o longitudes diferentes.

Supongamos que ahora se realiza el experimento recíproco al que he descrito. Ahora hay un reloj fijo un punto M' del sistema A por el que "las agujas dan una vuelta" (es decir, pasa una hora de duración propia). Este reloj se cruza, al principio y al final de la hora, con dos relojes P' y Q' fijos en B que, por comparación posterior, deducen que la "vuelta de las agujas" ha durado dos horas (duración impropia). Esto es lo que significa realmente la equivalencia de los sistemas. Donde antes teníamos A, ahora tenemos B. Pero, atención, éste es un experimento distinto al anterior, el sistema propio y el que no es propio están intercambiados, y si nos limitamos a decir "cada uno ve que los relojes del otro retrasan", estaremos mezclando en una única frase dos experimentos totalmente distintos. La realidad es que: "dos relojes distintos y distantes de un sistema, por comparación, podrán deducir que un único reloj fijo en el otro sistema retrasa (que este reloj marca menos que lo que deducen ellos por comparación)", pero que si "un único reloj fijo en un sistema ve el paso sucesivo de dos relojes distintos y distantes de otro sistema, verá que estos relojes adelantan (es decir, su diferencia indicará que ha transcurrido más tiempo que en el primero)." La segunda afirmación se deduce de la primera.

Volvamos ahora al viaje de ida de A1 para visitar a su amigo A2 (se puede ser amigos a distancia, pero no gemelos; no confundamos A2 con el verdadero gemelo A1', el que ha permanecido siempre en el extremo izquierdo de la varilla, del cual hablaré después). Recordemos que el viaje de A1, en el tren B, dura 10 segundos, mientras que en la vía han pasado 20 segundos. Pero, ¿cómo se mide esto? A1 parte del extremo izquierdo de la vía y monta en el tren cuando en los relojes de la vía (y también en los del tren, puesto que en los dos sistemas han decidido situar el origen de tiempos coincidiendo con este acontecimiento) son las $t = 00$ seg; mide la duración del viaje con su reloj, que ahora está en reposo en B (10 seg), baja del tren en la estación donde lo espera A2 y ve el reloj de la estación (ojo, otro reloj distinto, situado a 17,32 seg-luz del de la estación de salida) que marca las $t = 20$ seg. Por tanto, A1 no se compara sólo con A2, sino con dos relojes distintos y distantes de A.

Para la RE, las dos medidas del tiempo son igualmente buenas, pero tienen distinto significado. En general, los sistemas A y B son equivalentes para analizar experimentos y para predecir resultados observables, pero para el experimento concreto que analizamos en cada caso, sólo en uno de los dos sistemas la duración del viaje es propia, mientras que en otro es la distancia la que es propia. Los sistemas son equivalentes, pero no intercambiables, luego no debe extrañarnos que el viajero A1, solidario a uno de los sistemas, experimente el tiempo de forma diferente al amigo A2, que está fijo en el otro sistema. El proceso "viaje" tiene como sistema propio el tren B, mientras que el objeto "tramo de vía" tiene como propio el sistema vía A. Recordemos que cada proceso y cada objeto sólo tienen un sistema de referencia que le es propio; claro, el sistema propio en cada caso depende del fenómeno que consideremos, pero esto no nos dice nada en contra de la equivalencia de los sistemas A y B. La equivalencia entre ambos sistemas se pone de manifiesto en cuanto que, para un mismo experimento, predicen el mismo resultado (A1 llegará a tiempo a su cita con A2). La verdadera equivalencia entre A y B quedará más clara aún cuando analicemos otro experimento distinto: el viaje de B2 por el tren para visitar a su amigo B1; en este viaje, que es, como digo, otro experimento distinto, veremos que los papeles en cuanto a sistemas propios se intercambian, pero la equivalencia se manifestará en que el resultado predecible será coherente.

En un ejemplo parecido, que tú das en <http://www.geocities.com/newmodel2k/Posturas.htm> dices textualmente: "Durante todo el viaje GemeloA observa que los relojes de GemeloB marchan a la mitad de su propio ritmo, produciendo un atraso acumulado de 10 años. También GemeloB observa que los relojes de GemeloA marchan a la mitad de su propio ritmo a lo largo de todo el trayecto". Substituyamos GemeloB por A1 y GemeloA por A2, y 10 años por 10 segundos, y estamos de nuevo en el ejemplo actual: "Durante todo el viaje A2 observa que los relojes de A1 marchan a la mitad de su propio ritmo, produciendo un atraso acumulado de 10 años. También A1 observa que los relojes de GemeloA marchan a la mitad de su propio ritmo a lo largo de todo el trayecto". Pero, atención, esto no es cierto. Hemos visto que A1 tiene un único reloj, y que en A hay dos relojes distintos y distantes. A2 no tiene oportunidad de observar la "salida" de A1 desde el extremo izquierdo de la varilla (ésta es la diferencia con el auténtico gemelo A1', que se quedó en su lugar de origen), y no puede saber (si es que no lo calcula mediante la RE), qué marcaba el reloj del tren que pasaba por el punto de salida cuando A1 cuando salió. Por su parte, A1, que sólo cuenta con un reloj, no puede observar ningún retraso en el reloj de A2, pues no lo ve hasta que llega al lugar de encuentro; sólo entonces ve que el reloj de la estación donde está A2 no ha retrasado, sino que ha adelantado, comparando la medida del suyo y la observación que hizo en el reloj de la estación de partida. Y ello es porque aquí, en este problema concreto, el comportamiento de los relojes y de los objetos no es simétrico respecto a los dos sistemas: como ya he dicho, en uno hay dos relojes distantes y en reposo en la vía, y en el otro un sólo reloj del tren que viaja entre los dos anteriores. Sencillamente, la segunda parte de la frase es errónea, y el error proviene de la ambigüedad de la frase "cada uno ve que los relojes del otro retrasan".

Llegados a este punto, podemos proseguir, o quizá reiniciar, el diálogo que tú planteas en tu página <http://www.geocities.com/newmodel2k/Posturas.htm> entre OG1 (el "forofo" de la RG) y OG4 (el crítico). Aquí yo adoptaré el papel de OG1, y trataré de poner en boca de OG4 los argumentos y objeciones que plantearía una persona del grupo OG4 y que estuviese de acuerdo con todo lo que se dice en tu sitio. Disculpa si tú no asumes algunas de las afirmaciones o preguntas de OG4 como propias, pero esto no es más que una ficción.

OG1.- Creo que en el día anterior no elegí bien mis argumentos y concedí demasiadas cosas. Ahora asumo como propio todo lo dicho anteriormente por el autor de estos comentarios. Si se definen adecuadamente los sistemas de referencia y se tiene en cuenta cuál es la duración propia del viaje, no aparece ninguna paradoja, o bien ésta es sólo aparente. Los sistemas no son intercambiables, pues los acontecimientos no son idénticos en uno y en otro sistema. El viaje de A1 dura 10 segundos de duración propia (medido en B) y 20 segundos de duración impropia (medida en A), y esto es inamovible. Si la duración del tiempo de las aceleraciones es despreciable respecto a la duración total del viaje, podemos bastarnos con la RE, y como no hay ninguna paradoja, no necesito invocar a la relatividad general.

OG4.- Bien, supongamos ahora que los de B deciden medir el proceso "espera" de A2 en la vía. Este suceso comienza y acaba en el mismo punto de la vía, y por tanto, tiene una duración, que tú llamarás "propia" de 20 segundos. Y a una duración propia de 20 segundos le corresponde, según tú, una duración impropia de 40 segundos. Pero según tus cálculos, que los dos estamos de acuerdo en que coinciden con lo que se ha observado, el viaje dura para A1 (en el tren) sólo 10 segundos. La paradoja se mantiene y no hay forma de evitarla.

OG1.- ¡Eh!, un momento. ¿De donde te sacas que la duración propia de la espera de A2 dura 20 segundos?

OG4.- La distancia que recorre A1 es de 17,32 seg-luz medidos en A, y A1 (en el tren) se mueve a 0,866 c respecto a A, luego el viaje de A1 (y la espera de A2) dura 20 segundos en A. En esto no hay ninguna duda.

OG1.- Estoy de acuerdo en que el viaje de A1 dura 20 segundos en la vía, pero no veo claro que eso sea una duración propia. Yo mantengo que es una duración impropia.

OG4.- ¡Pero si A2 no se mueve en todo el rato de su sitio en la vía!

OG1.- Pero, vamos a ver, con calma. ¿Cuándo comienza la espera de A2?

OG4.- Cuando A1 sube al tren, se sienta junto a B1 e inicia el viaje, por supuesto. Los relojes de toda la vía han sido previamente coordinados mediante señales luminosas, y todos tienen un horario común. La espera comienza a las $t = 00$ seg de la vía y del tren.

OG1.- Y, ¿cuándo acaba?

OG4.- Pues cuando A1 llega a la estación donde espera A2 y baja del tren. Es decir, a las $t = 20$ seg, hora de la vía A, y según el reloj de A1, a las $t' = 10$ seg del tren. Pero yo he deducido también que el reloj del tren debe marcar las $t' = 40$ seg, y por tanto la paradoja es inevitable.

OG1.- Pero los procesos se definen como el lapso de tiempo entre dos acontecimientos, que ocurren en un lugar y a una hora. Tú defines un proceso "espera" que comienza con un acontecimiento que tiene lugar en el punto "extremo izquierdo de la vía" (para A) y "asiento junto a B1 del tren" (para B), y acaba en la "estación de A2" (para A) y también en el "asiento junto a B1 del tren" (para B). Luego tu "espera" de A2 coincide con mi "viaje" de A1, y sigue siendo un proceso copuntual para B, pero no para A. Por tanto, son los de B quienes miden la duración propia del proceso, que es de 10 segundos, como se observa en la realidad; tu cálculo de 40 segundos está equivocado. Tal como tú la has definido, la "espera" de A2 de 20 segundos continúa siendo una duración impropia.

OG4.- De acuerdo, de acuerdo. Pero es evidente que A2 no se mueve en todo el rato. ¿Por qué no podemos considerar este proceso como una duración propia?

OG1.- Sí que podemos hacerlo. Pero entonces debemos buscar, para definir el inicio del proceso, algún acontecimiento que sea copuntual en la vía con la llegada de A2.

OG4.- Y, ¿no sirve la salida de A1?

OG1.- No, porque este acontecimiento ocurre muy lejos de donde está A2: a 17,32 seg-luz, y A2 no puede observarlo directamente.

OG4.- Supongamos que elijo, para definir el comienzo de la espera, el acontecimiento: "el reloj de la estación de A2 marca las $t = 00$ seg". Ya tengo un acontecimiento copuntual en la vía con la llegada de A2. Los dos ocurren en la estación de A2.

OG1.- Muy bien: el proceso "espera" de A2 comienza cuando el reloj de la estación de A2 marca las $t = 00$ seg, y acaba cuando este reloj marca las $t = 20$ seg, es decir, cuando llega A1. El comienzo y el final de la espera, así definidos, son copuntuales en A2.

OG4.- Luego, hablando con tu propia terminología, la espera, así definida, tiene una duración propia de 20 segundos (medida en A). ¿De acuerdo?

OG1.- De acuerdo.

OG4.- Pero sabemos que a una duración propia de 20 segundos le corresponde una duración impropia de 40 segundos. La espera de A2 es lo mismo que el viaje de A1, según tú has argumentado, luego el viaje de A1 debería durar 40 segundos en B. Pero todos hemos visto que el reloj de A1, al bajar del tren, marcaba $t' = 10$ seg. ¡La paradoja permanece en pie!

OG1.- No no, esto no es así. Lo que yo he dicho es que, tal como tú habías definido antes la espera de A2 (mediante acontecimientos copuntuales en B, pero no en A), ésta coincidía con el viaje de A1, y por eso la duración del viaje de 10 segundos era una duración propia. Ahora tú has cambiado la definición de la espera de A2, definida ahora mediante acontecimientos copuntuales en A, para conseguir que la duración de ésta (20 segundos) sea una duración propia. Por lo tanto, si quieres describir cómo los de B medirán esta duración, no puedes comparar únicamente con B, que llega al punto de espera cuando ésta acaba.

OG4.- No, ¿por qué?

OG1.- Porque A1 no se encuentra en el punto A2 cuando comienza la espera, es decir, cuando el reloj de la estación marca las $t = 00$ seg, y no puede poner su reloj en marcha cuando la espera comienza para A2.

OG4.- Está bien. ¿Cómo medirán los de B la duración impropia de la espera?

OG1.- Pues tal como yo lo describí para medir la duración impropia del viaje. Es necesario que A1 (o mejor B1, que viaja a su lado y siempre ha estado y se quedará en el tren) se coordine con algún otro observador lejano del tren, que llamaremos Bn, que pase por la estación de A2 cuando éste se sienta en el banco de la estación para comenzar la espera. Bn y B1 deben mirar por la ventanilla y ver, sucesivamente, a A2 cuando comienza y acaba su espera en la estación. Después compararán sus relojes y obtendrán la duración impropia de la espera: 40 segundos. Pero, insisto, esta duración impropia debe obtenerse por comparación de los relojes distantes de B1 y Bn, y no mediante el único reloj de A1.

OG4.- Muy bien. En el momento $t' = 00$ seg de B (en el tren también han coordinado sus relojes), es decir, cuando A1 sube y se sienta junto a B1, Bn ve a A2 que se sienta en la estación. El tren avanza y, al cabo de un rato, B1 y A1 llegan a donde espera A2, A1 se despide de B1 y baja del tren para encontrarse con A2. ¿Qué marcarán los relojes de B en este momento? Ahora, mediante la acción coordinada de Bn y B1, en B han medido la espera de A2, que sabemos que tiene una duración propia de 20 segundos. Luego el reloj de B1 debe marcar 40 segundos (duración impropia de la espera). Sin embargo, sabemos que al bajar A1, su reloj marca 10 segundos. ¡Pero A1 ha viajado junto a B1!! ¿Cómo se explica esto? La paradoja resurge cada vez con más fuerza.

OG1.- Un momento, un momento... Esto no puede ser así. Déjame pensar un poco.

OG4.- Pues yo lo veo clarísimo. No sé cómo la RE puede salir de esto, y cómo tú vas a poder seguir defendiéndola con tanto afán.

OG1 (después de pensar largo rato).- Atención, ya lo veo claro. Has omitido una consecuencia muy importante de la RE, que es la relatividad de la simultaneidad.

OG4.- Oye, vosotros, los relativistas ortodoxos, sois muy duros de pelar, y no dais fácilmente el brazo a torcer. ¿Cómo puedes afirmar que he omitido la "relatividad de la simultaneidad"?

OG1.- Pues claro, ¿no admites esa consecuencia de la RE?

OG4.- Ya lo creo que la admito, y yo mismo la he utilizado implícitamente al hacer mis esquemas sobre el "lío de los relojes". Ya te he dicho que yo admito todas las consecuencias matemáticas de la RE, sólo que las interpreto de manera diferente a ti porque creo que la

interpretación ortodoxa lleva a paradojas como la que nos encontramos. La relatividad de la simultaneidad dice que dos acontecimientos que son simultáneos a distancia en un sistema de referencia no serán simultáneos en otro sistema que se mueve respecto al primero.

OG1.- Exacto.

OG4.- Pero, ¿que tiene esto que ver con lo que estamos ahora discutiendo?

OG1.- Pues claro que tiene que ver. Fíjate en que tú has definido el comienzo de la espera de A2 mediante el acontecimiento "el reloj de la estación de A2 marca las $t = 00$ seg".

OG4.- Ya lo sé, ¿y qué?

OG1.- Pues que éste es un acontecimiento simultáneo en la vía a "A1 sube al tren e inicia el viaje". Pero son acontecimientos simultáneos a distancia.

OG4.- Sí, es verdad.

OG1.- Y los dos acontecimientos simultáneos en la vía ($t = 00$ seg) no pueden ser simultáneos en el tren. Por tanto, cuando A1 suba al tren, si el reloj de las dos estaciones distantes (salida y llegada de A1) de la vía marcan $t = 00$ seg, y el reloj de B1 también marca $t' = 00$ seg, entonces el reloj que lleva el observador del tren Bn que en ese momento (de A: $t = 00$ seg) pasa por delante de A2, no puede marcar las $t' = 00$ seg, sino otra hora distinta. Y viceversa: supongamos que otro observador Bm del tren pasa por delante de A2 cuando su reloj marca las $t' = 00$ seg, es decir, en el mismo momento del tren en que A1 sube junto al asiento de B1; entonces este par de acontecimientos simultáneos en el tren no lo serían en la vía, y en el momento de paso de Bm el reloj de A2 no podría marcar las $t = 00$ seg, sino otra hora distinta. El paso de Bm (a las $t' = 00$ seg del tren) no podría coincidir con el inicio de la espera.

OG4.- Esto es cierto. Yo mismo lo admití al dibujar mis esquemas sobre el "lío de los relojes".

OG1.- Y, si recuerdas, tú mismo usaste algo parecido al describir tu "experimento recíproco": en ese experimento (que es distinto a este) tú decías que B1 pensaba que B2 ya había partido, cuando en realidad B2 todavía estaba tomando el té. Sólo que entonces hablabas de duraciones y tiempos absolutos, y en eso sabes que yo puedo estar de acuerdo.

OG4.- Bueno, dejemos eso ahora. Según tú, ¿Que conclusión debemos sacar de todo esto?

OG1.- Déjame un momento para poder rehacer los cálculos.

OG4.- Vale.

OG1 (Después de trazar unos garabatos en un papel).- Ya lo tengo claro. Consideremos primero al observador Bn, el que pasa por delante de A2 en el momento de la vía $t = 00$ seg, es decir, simultáneamente (para A) a la salida de A1. ¿Qué marcará el reloj de Bn cuando se cruza con A2? Ahora debemos usar la transformación de Lorentz para el tiempo (v., por ejemplo, Física, M. Alonso - E. Finn, ec. 19.2, p. 408, o de la edición antigua en tres volúmenes, ec. 6.33, vol. I, p. 139): $t' = (t - vx/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, donde t' es lo que marca el reloj en B (lo que buscamos), t es el tiempo que marca el reloj en A ($= 0$), v es la velocidad de B respecto a A ($= 0,866 c$), x es la posición en el sistema A del acontecimiento considerado ($= 17,32$ seg-luz, pues tomamos el origen de las distancias de A en la estación de salida), y c es la velocidad de la luz; luego $t' = (0 - 8,666c \cdot 17,32 \text{ seg-luz} / [1 - (0,866 c)^2 / c^2]^{1/2} = -30$ segundos.

OG4.- ¿Has tenido cuidado con las unidades usadas?

OG1.- He intentado tener cuidado. De todas maneras, repasa mis cálculos, por favor.

OG4.- Estamos usando, para el espacio, seg-luz, y para el tiempo, segundos. En el sistema de unidades que usamos, la velocidad de la luz es $c = 1$ (pues $c = 1 \text{ seg-luz} / 1 \text{ seg}$). Luego si somos coherentes al introducir los valores de las magnitudes conocidas, obtendremos segundos.

OG1.- Por eso yo he dado mi resultado en segundos. El signo menos sólo significa que tomamos el origen de tiempos cuando A1 sube al tren. En el sistema B, el acontecimiento "cruce de Bn con A2" no es simultáneo a este, sino que tuvo lugar 30 segundos antes.

OG4.- Esto coincide con mis dibujos. Recuerda el "lío de los relojes". Bn se identifica con B3, como se observa en la figura 1 de la página que analizamos.

OG1.- Claro; esos dibujos son correctos.

OG4.- Pero, ¿cómo afecta esto a lo que estamos discutiendo?

OG1.- Recuerda que lo que B1 y Bn desean es medir la duración impropia de la "espera", que hemos definido como el proceso copuntual en el sistema A, entre $t = 00$ seg y $t = 20$ seg (relojes de A). Cuando A2 comienza la espera ($t = 00$ seg), el reloj del tren Bn que pasa por su estación marca $t' = -30$ segundos. Cuando la espera acaba ($t = 20$ seg), llega A1 (junto a B1) a esa estación. Según sabemos, y en eso estamos de acuerdo desde el principio, cuando A1 llega a la estación de A2 su reloj (y todos los de B) marca $t' = 10$ seg. Luego entre el comienzo y el final de la espera, en tiempo de B han pasado 40 segundos, que es la duración impropia correcta.

OG4.- Es lo que yo había calculado.

OG1.- Sí, sólo que ahora ya no hay paradoja. Cuando B1 y Bn (que según tú, es B3) corroboren sus datos, concluirán que ésta es la duración del proceso "espera" en B. Pero el observador A2, que ve pasar sucesivamente a Bn y a B1 (que acompaña a A1), si miró a través de la ventanilla y vio lo que marcaban los dos relojes sucesivos de B, corroborará éste mismo resultado.

OG4.- Ahora comprendo la inexactitud de la frase "cada uno ve que los relojes del otro atrasan".

OG1.- Claro, no es lo mismo que dos observadores distantes de un sistema observen la marcha de un reloj (este atrasará), que un observador observe el paso sucesivo de dos relojes. Como vemos aquí, mientras que para A2 pasan 20 segundos, él ve que si compara el reloj de Bn con el reloj de B1 (o con el de A1), en B han pasado 40 segundos. Podríamos decir que estos adelantan.

OG4.- Es cierto. Parece que todo se aclara. Pero, dime, según tú, ¿a qué distancia de B1 se encuentra Bn en el sistema B? Me interesa comprobar que realmente Bn es el B3 de mis dibujos.

OG1.- Debe ser así, puesto que éstos son correctos. Como la velocidad del tren respecto a la vía es de $0,866 c$, en 40 segundos del tren debe haber pasado por A2 un fragmento de tren de $34,64$ seg-luz. Entre B1 y Bn hay $34,64$ seg-luz de tren. Luego, si identificamos a Bn con B3, como se deduce de la figura 1, eso significa que la longitud de cada fragmento (vagón) de tu tren (por ejemplo, entre B1 y B2), medida en el mismo tren (sistema B), es de $17,32$ seg-luz.

OG4.- Yo mismo admití, en el análisis del "experimento recíproco" que los observadores del tren miden esa distancia entre B1 y B2. Luego, efectivamente, la distancia entre B1 y B3, medida en por los observadores del tren es, efectivamente, de $34,64$ seg-luz. Sin embargo, en la misma figura 1 se ve que, en la vía, la salida de A1 y el comienzo de la espera de A2 (paso de B3 por A2) son acontecimientos separados por sólo $17,32$ seg-luz.

OG1.- Sí, ipero no hay ninguna paradoja!

OG4.- No te alarmes, no te alarmes, que yo no he dicho eso. Esto debe estar relacionado con la relatividad de la longitud, que yo también acepto.

OG1.- Claro: la relatividad de la longitud puede considerarse una consecuencia directa de la relatividad de la simultaneidad. El fragmento de tren entre B1 y Bn (que es B3) está en reposo en el tren, luego la medida de $34,64$ seg-luz que hemos dado es una longitud propia, a la cual corresponde una longitud impropia de $17,32$ seg-luz medidos en la vía...

OG4.- ... que se miden mediante los acontecimientos simultáneos en la vía "salida de A1" y "comienzo de la espera de A2", a las $t = 00$ seg de la vía, acontecimientos separados en la vía 17,32 seg-luz que se producen frente a B1 y Bn (= B3) del tren.

OG1.- Veo que empezamos a ponernos de acuerdo.

OG4.- No podía ser menos. Si en el cálculo de esta longitud B1-Bn hubiésemos usado directamente la transformación de Lorentz $x' = (x - vt/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, hubiésemos obtenido el mismo resultado, pues $t = 00$ seg.

OG1.- Esto es así porque la fórmula que transforma la longitud propia e impropia se deduce directamente de ésta.

OG4.- ¿Y que pasa con el otro observador del tren, Bm, que has citado antes?

OG1.- Bm se cruza con A2 en el momento $t' = 00$ seg del tren, es decir, simultáneamente (en B) con la salida de A1, pero como la simultaneidad en B no coincide con la simultaneidad en A, el reloj de A2 no puede marcar también $t = 00$ seg, y el paso de Bm por A2 no sirve para definir el comienzo de la "espera".

OG4.- Sí, sí, Esto ya quedó claro antes.

OG1.- Perdona, ya sé que me repito mucho y que me enrolló como las persianas. Para abreviar, no calcularemos t , pero...

OG4.- ¿Cómo que no? Ya que hemos hecho tanto esfuerzo hasta aquí... Yo deseo comprobar si todo cuadra o no, pues mantengo mis sospechas sobre la RE.

OG1.- Haces bien, hay que comprobarlo todo hasta el final. La pereza nunca ha hecho avanzar la ciencia. Pero, ayúdame, porque mi cabeza está empezando a echar humo.

OG4.- De acuerdo. Apliquemos la transformación de Lorentz como antes.

OG1.- Pero ahora hemos de calcular t , es decir, el tiempo en A.

OG4.- Podemos usar la misma fórmula de antes, poner en el primer miembro el valor de t' , que conocemos, y despejar t .

OG1.- Podríamos hacerlo así, pero yo prefiero usar las transformaciones de Lorentz inversas, que dan directamente el valor de t . Éstas se obtienen despejando a partir de las primeras. Para el tiempo, usamos la cuarta (v., por ejemplo, Física, M. Alonso - E. Finn, ec. 19.4, p. 409, o de la edición antigua en tres volúmenes, ec. 6.34, vol. I, p. 140): $t = (t' + vx'/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, donde t es lo que marca el reloj en A, t' es el tiempo que marca el reloj en B (= 0), v es la velocidad de B respecto a A (= 0,866 c), x' es la posición en el sistema B del acontecimiento considerado, y c es la velocidad de la luz. Si quieres, luego tú puedes comprobarlo de la otra forma.

OG4.- Pero no conocemos el valor de x' , que sería la posición de Bm.

OG1.- Tienes razón; quizá tu método era más directo. Pero ya que estamos enfangados, tiremos para adelante.

OG4.- Muy bien, para hallar x' hemos de aplicar la primera transformación de Lorentz directa: $x' = (x - vt/c^2) / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$, donde x será la posición en A del acontecimiento que estudiamos, cruce de Bm y A2 (= 17,32 seg-luz), y los demás datos, los mismos que en la ecuación que tú has planteado.

OG1.- Ahora nos falta el valor de t ; esto es precisamente lo que buscamos.

OG4.- Podemos plantear un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, y resolverlo. Así hallaremos al mismo tiempo el valor de t y el valor de x' , que también nos interesa.

OG1.- Tú lo que quieres es identificar Bm con alguno de los pasajeros de tu tren.

OG4.- Claro, porque tomando también como origen de distancias en el sistema B el punto donde A1 sube al tren, es decir, el asiento de B1, x' nos dará la distancia, medida en el tren, entre el extremo izquierdo del tren, que ocupa B1, y Bm.

OG1.- De acuerdo. Escribe tú las ecuaciones y resuélvelas, por favor.

OG4.- Pues sustituyendo los valores conocidos en la cuarta transformación inversa, tenemos: $t = (0,866c \cdot x' / c^2) / 0,5$; y de la primera transformación directa, es $x' = (17,32 \text{ seg-luz} - 0,866c \cdot t / c^2) / 0,5$.

OG1.- Perfecto. Ahora hacemos $c = 1$ y obtendremos x' en seg-luz y t en segundos.

OG4 (Después de ensuciar otro papel, con el consiguiente perjuicio para la selva amazónica).- Resuelto el sistema de ecuaciones, obtenemos $x' = 8,66 \text{ seg-luz}$ y $t = 15 \text{ seg}$. Si quieres, sustituye los valores obtenidos en las ecuaciones y verás que las satisfacen.

OG1.- No es necesario. Te considero un consumado relativista.

OG4.- Gracias. Ten en cuenta que yo siempre he aceptado y usado las transformaciones de Lorentz.

OG1.- Ya lo sé. Por eso me satisface discutir contigo.

OG4.- De todas formas, veamos si estas soluciones son coherentes, para agotar la posibilidad de cualquier paradoja en la RE.

OG1.- De acuerdo. En primer lugar, como la distancia A1 (punto de partida) - A2 es un fragmento de vía fijo en el sistema A, los 17,32 seg-luz que los separan son la longitud propia de ese fragmento de vía. El cruce simultáneo en B, a las $t' = 00 \text{ seg}$ de B, de B1 con A1 (cuando A1 sube al tren) y de Bm con A2, significa una medición de la longitud de A1-A2 mediante observaciones simultáneas en B, es decir, la medida de su longitud impropia en B. Y a una longitud propia de 17,32 seg-luz le corresponde una longitud impropia de 8,66 seg-luz. Luego el valor de x' hallado, 8,66 seg-luz, que es la distancia entre B1 y Bm, es también la longitud impropia de A1-A2 en B. Bm debe situarse en un punto intermedio entre B1 y B2.

OG4.- Pero eso no concuerda con mis dibujos. El punto intermedio entre B1 y B2 nunca se encuentra con A2.

OG1.- Pero eso es porque todos tus dibujos están hechos desde el punto de vista de A. Fíjate que en ellos siempre los tiempos son iguales en cada punto sólo en A, mientras que en B siempre son distintos en cada punto. Todos tus dibujos representan acontecimientos simultáneos en A.

OG4.- Sí, porque yo considero que A coincide con un marco de referencia localmente estacionario, que representa la auténtica realidad.

OG1.- Bueno, ya discutiremos sobre eso en otro momento. Lo que nos interesa ahora es ver si hay paradojas en la RE o no, en el experimento que analizamos.

OG4.- De acuerdo; el tema de los MRLE queda pendiente para otra ocasión. Digamos que mis dibujos representan momentos simultáneos en A. Y ya sé que lo que es simultáneo para A no lo es para B.

OG1.- En eso estamos de acuerdo. En otra de tus páginas puedes ver un esquema en que se observa un momento simultáneo para el eje B, donde los relojes de A marcan una hora en cada punto.

OG4.- Esto es consecuencia de las transformaciones de Lorentz.

OG1.- De acuerdo. El paso de B1 por A1 (partida de A1) y el paso de Bm por A2 son acontecimientos simultáneos en B, pero no en A. Si hubieses hecho esquemas para momentos simultáneos en B, podrías haber hecho coincidir Bm con A2, pues únicamente tendrías que haber tenido en cuenta la relatividad de las distancias, y que al hacer coincidir A1 con B1 y A2 con Bm simultáneamente en B, se está midiendo la longitud impropia A1-A2 en B.

OG4.- Supongo que sí. Quizá un día me decida a hacer esos dibujos. Sigamos adelante.

OG1.- Estamos de acuerdo, pues, en que la distancia B1-Bm en el tren es de 8,66 seg-luz, y que esto es lo que miden también los de B para la distancia A1 (punto de partida) - A2 (punto de llegada). Como el tren se mueve respecto a A a $0,866 c$, el tren recorrerá esta distancia en 10 segundos, medidos también en el sistema B.

OG4.- Pero esto es lo que dura el viaje de A1, medido en los relojes de B.

OG1.- Claro; en eso estamos de acuerdo desde el principio. Vemos que el valor de x' hallado, que represente la distancia entre B1 y Bm en el tren, es coherente con lo que ya sabíamos.

OG4.- Es cierto. Pero, ¿cómo interpretamos el valor hallado $t = 15$ seg?

OG1.- Éste es momento, en tiempo de A, del paso de Bm por A2, simultáneo a la salida de A1 en el tren, pero no en la vía. Por eso A2 no puede identificarlo con el comienzo de su espera.

OG4.- Eso ya lo sabíamos.

OG1.- Perdona por mis repeticiones. A mí me sirven también para recordar y asentar mis ideas.

OG4.- No pasa nada.

OG1.- El caso es que, cuando Bm pasa por la estación de A2, ya hace mucho rato (15 segundos) que pasó por allí Bn y que comenzó la "espera" de A1.

OG4.- Esto me recuerda que, como tú has mencionado antes, en mi análisis sobre el "experimento recíproco" (viaje de B2 hacia B1), B1 comienza la espera 15 segundos antes de la partida "real" de B2.

OG1.- Dejemos ahora lo que es real y lo que no.

OG4.- De acuerdo. Hemos decidido dejar la cuestión de los MRLE para otro rato.

OG1.- El caso es que, como la espera de A dura 20 segundos, entre los acontecimientos "paso de Bm por A2" y "llegada de A1 a A2" sólo pasan, medidos en A, 5 segundos.

OG4.- Sin embargo, hemos quedado en que los acontecimientos "paso de Bm por A2" y "salida de A1" son simultáneos en B, y sabemos que entre la salida de A1 y la "llegada de A1 a A2" pasan 10 segundos para B; ésta es la duración del viaje de A1 que hemos comprobado mediante el reloj de A1 al bajar del tren.

OG1.- Claro; los acontecimientos "paso de Bm por A2" (simultáneo en B a la salida de A1) y "llegada de A1 a A2" son copuntuales en A (ocurren en el mismo punto A2 de A). Luego los 5 segundos medidos por A entre estos dos acontecimientos son la duración propia del lapso de tiempo que hay entre ellos. A esta duración propia de 5 segundos le corresponde una duración impropia de 10 segundos, que es precisamente la duración del viaje en B, es decir, el tiempo que pasa en B desde la salida de A1 (simultánea, como digo, en B al paso de Bm por A2) y la llegada de A1 a A2; esta es la duración impropia, porque está medida con dos relojes diferentes de B que pasan por A2 (el de Bm y el de B1) y que deben comparar sus datos con posterioridad.

OG4.- Vaya, con tus duraciones y longitudes propias tienes solución para todo.

OG1.- Recuerda que las fórmulas que transforman duraciones y longitudes propias e impropias se deducen de las transformaciones de Lorentz, que tú aceptas.

OG4.- Y parece que todo cuadra.

OG1.- Así es. Como ves, yo no veo ninguna contradicción entre las consecuencias de la RE, al menos para el experimento que estamos analizando.

OG4.- Prometo revisar mis análisis y argumentos anteriores, y pensar en todo ello con calma.

OG1.- Eso te llevará cierto tiempo. A mi también me ha costado analizar lo que tú planteabas.

OG4.- De todas formas, continuaré investigando la RE por si contiene otras contradicciones ocultas.

OG1.- Está bien. Si descubres algo, me avisas.

El experimento recíproco

Analicemos ahora el otro experimento que tú planteas, y que llamas el "experimento recíproco". Recordemos, sin embargo, que se trata de un experimento diferente. Analizaremos el viaje de B2, a la luz de la RE, tanto desde el punto de vista de los observadores de B como desde el punto de vista de los observadores de A, veremos que los resultados predichos y observables por los dos conjuntos de observadores son los mismos: B2 llegará a tiempo a su cita con B1. Después veremos las diferencias y semejanzas con el primer experimento (viaje de A1), y comprobaremos la perfecta equivalencia entre ambos sistemas, y que no hay necesidad de hablar de distancias ni duraciones "reales" ni "aparentes", ni de sistemas MRLE ni nada parecido.

Ahora es el observador B2 el que decide hacer un viaje hasta B1. Seguiré llamando "tren" al sistema B y "vía" al sistema A para mantener la coherencia de la descripción, y para aclarar lo que quiero demostrar: que como sistema de referencia, el tren B es tan bueno como la vía A. ¿Cómo realiza B2 el viaje? Bueno, supongamos que se baja del tren, se sienta tranquilamente en la estación y espera a que pase B1. Esto es perfectamente equivalente a lo que tú describes: B1 se mueve ahora respecto al tren B, solidario con la vía A, a una velocidad respecto al tren de $-0,866 c$. Pero ojo, si fuésemos coherentes con tu suposición de que la vía es un sistema MRLE, habría que decir que B2 no se mueve en absoluto durante su "viaje", sino que se desacelera y espera en reposo absoluto hasta que pase todo el tren y llegue B1. Pero, para la RE, da igual decir que B1 (sentado en su vagón del tren) se mueve respecto a B2 (en reposo en la vía) a $0,866 c$, que decir que B2 (sentado en la estación) se mueve respecto a B1 (en el tren) a $-0,866 c$.

Primera cuestión: ¿cuál es la distancia entre B1 y B2? Tú dices que, antes de iniciar su "viaje" (o "espera") B2 y B1 están "realmente separados" por $8,66$ seg-luz (la distancia que miden los de A), pero ellos "creen que están separados" por $17,32$ seg-luz. Yo (con la RE) prefiero analizar esto así: la distancia B1-B2 es un objeto del tren, en reposo en el sistema B, con los puntos extremos inmóviles en él; por ejemplo, podría ser un vagón. Luego los de B pueden medir directamente el vagón por el procedimiento que sea, con un metro o con señales de luz, da igual; el caso es que miden una longitud propia, que resulta ser de $17,32$ seg-luz. Sin embargo, el tren se mueve respecto a la vía, luego la longitud que miden los de A es una longitud impropia. Hacemos los cálculos según la RE y concluimos que los de la vía observan que el vagón mide $8,66$ seg-luz. Si lo prefieres, fueron los de la vía, ayudados por tu "instantánea mágica", los que primero midieron la longitud del vagón (en movimiento respecto a ellos), comunicaron su resultado a los del tren y estos hicieron la conversión según la RE y comprobaron el resultado. Da igual: la medida del vagón B1-B2 realizada en el tren B ($17,32$ seg-luz) es la longitud propia del vagón, mientras que la medida del vagón que hacen los de la vía A ($8,66$ seg-luz) es una longitud impropia (longitud de un objeto en movimiento respecto a ellos). Si tú prefieres llamar siempre "reales" a las medidas que hacen los de A, y siempre "aparentes" a las medidas de B, pues bueno: la longitud "real" del vagón es la longitud impropia, mientras que su longitud "aparente" es la "propia".

¿Y que pasa con la duración del viaje (o espera) de B2? B2 se mueve solidario con el sistema A; podríamos decir que espera sentadito tranquilamente en la estación a que llegue el extremo del tren, que trae a su amigo B1. Según tu suposición, como la vía A es un MRLE, espera en reposo absoluto; según la RE, en reposo relativo a la vía A. Es igual; en cualquier caso, según se observa en tus dibujos, el comienzo y el final del viaje (o espera) tienen lugar el mismo punto del sistema A, un punto situado 17,32 seg-luz a la derecha de A2, que yo llamo "estación de B2", luego la duración propia del viaje es la que mide B2, que ahora es un observador del sistema A (ya que se mueve, o reposa, como todos los demás de A). Es decir, la duración propia del viaje (o de la espera) es de 10 segundos. Sin embargo, para los observadores del tren B (y con ellos, B1), la duración del proceso es una duración impropia, ya que ellos se mueven respecto a la vía y respecto a la estación donde espera tranquilamente B2 (o bien la estación y la vía se mueven respecto al tren, da igual); por tanto, los de B hacen una medición del lapso de tiempo, coherentemente con la RE, de 20 segundos. En el caso de la duración de proceso viaje de B2 (o espera), cuyo sistema propio es el A (vía), sí que coincide lo que tu llamas "real" con el concepto de "duración propia" de la RE.

Y ahora veremos el análisis del viaje (o espera) de B2 en los dos sistemas A y B, y veremos que predicen el mismo resultado observable. Los observadores de B observan que B2, que espera en la estación, "viaja" respecto a ellos a una velocidad de $-0,866 c$ cruzando una distancia del tren que es la de un vagón; para ellos, "retrocede" en el tren una distancia de 17,32 seg-luz en un tiempo de 20 seg. Veamos si las cuentas cuadran: distancia B1-B2 en el sistema B = velocidad del móvil \times tiempo en B: $17,32 \text{ seg-luz} = 0,866 c \times 20 \text{ segundos}$. Perfecto; B2 y B1 se encontrarán en el lugar y en el momento previsto.

Desde el punto de vista de los observadores de A, como la distancia entre B1 y B2 (longitud impropia del vagón) es de 8,66 seg-luz, pero la duración (propia) de la espera es de 10 segundos, también todo cuadra: distancia B1-B2 en el sistema A = velocidad del móvil \times tiempo en A: $8,66 \text{ seg-luz} = 0,866 c \times 10 \text{ segundos}$. B1 "retrocede" por el tren 8,66 seg-luz (medidos en A) en 10 segundos (medidos en A), a $0,866 c$, o bien espera en la estación durante 10 segundos a que el vagón, que para los de A mide 8,66 seg-luz, acabe de pasar y lleve a B1. Igualmente B1 y B2 se encontrarán en el momento y el lugar previsto.

Y ahora podemos igualmente preguntarnos quién tiene razón, y concluir, de manera semejante a como hicimos en el análisis del viaje de A1, que si queremos, podemos dar la razón en la medida de la duración a los de A, que miden la duración propia del viaje (o espera), y, en cuanto a la distancia, a los de B, que miden la longitud propia del vagón. Pero recordemos que lo que vale (lo que es físicamente definible) es el concepto de longitud o duración propia o impropia. Y en lo que sí que no estoy de acuerdo contigo es en que le des preferencia al sistema A. Fíjate, si hubieras decidido que el sistema MRLE es el B, en lugar del A, y hubieras hecho el análisis de los dos experimentos (el viaje de A1 y el de B2) desde ese punto de vista, hubieras llegado a los mismos resultados: con la suposición MRLE = B, los tiempos y las distancias que se medirían en cada sistema serían las mismas para cada experimento que con la suposición MRLE = A, y los hechos predichos serían los mismos: los viajeros siempre llegan a las citas, porque los tiempos y las longitudes están bien calculados. ¿Qué ventaja tiene, pues, una elección sobre la otra? Cualquiera de los dos sistemas te sirve como MRLE.

Comparemos, pues, ambos experimentos y veremos como los dos sistemas son equivalentes:

En el experimento 1 (viaje de A1) un viajero cruzaba una determinada distancia de A para encontrarse con un amigo distante del sistema A; la duración propia, medida por B, es de 10 seg; B medía también una longitud impropia de 8,66 seg-luz; la longitud propia, medida por A, es de 17,32 seg-luz, y A medía una duración impropia de 20 seg. Dábamos convencionalmente la razón a A en la medida de la distancia y a B en la medida de la duración. El viajero llegaba sin problemas a la cita, tanto si analizábamos el viaje desde el sistema A (del cual partía y al cual llegaba) como si lo analizábamos desde el sistema B, en el cual reposaba.

En el experimento 2 (viaje de B2) un viajero cruzaba una determinada distancia de B para encontrarse con un amigo distante del sistema B; la duración propia, medida por A, es de 10 seg; A medía también una longitud impropia de 8,66 seg-luz; la longitud propia, medida por B, es de 17,32 seg-luz, y B medía una duración impropia de 20 seg. Dábamos convencionalmente la razón a B en la medida de la distancia y a A en la medida de la duración. El viajero llegaba sin

problemas a la cita, tanto si analizáramos el viaje desde el sistema B (del cual partía y al cual llegaba) como si lo analizáramos desde el sistema A, en el cual reposaba.

Como observarás, he podido escribir este último párrafo por el procedimiento de "copiar y pegar", a partir del párrafo anterior, y cambiar después, donde decía, "experimento 1", por "experimento 2"; donde decía "A1", por "B2", y, sobre todo, donde decía "sistema A" por "sistema B", y donde decía "sistema B" por "sistema A", y todo queda coherente con el análisis realizado. Esto es una prueba suficiente de que, si cambiamos el experimento 1 por un experimento 2 en el cuál el papel del viajero cambie, pero todo lo demás se conserve igual, los dos sistemas A y B son perfectamente intercambiables.

Pero, ojo, son dos experimentos distintos: no se deben sólo comparar los análisis de los observadores de A en el experimento 1 con los de B en el experimento 2, y admirarse de que los números coincidan. Lo que hemos hecho es, para cada experimento, comparar las predicciones para hechos observables que se hacen en cada sistema y ver que coinciden en cuanto a los hechos que predicen: si los viajeros llegarán o no a tiempo a las citas. Y luego hemos comparado un experimento con el otro y hemos visto que, aunque los papeles en cuanto a cuáles son los sistemas propios respectivos para las duraciones y las distancias se intercambian, si la duración propia de un experimento es la misma que la del otro, la longitud propia recorrida será también la misma. Y lo que es más importante: no hay ninguna contradicción; si recuerdas el ejemplo que tú pones sobre el partido de tenis, tus jugadores afirmaban hechos observables distintos (los dos decían que habían ganado) sobre un mismo experimento (un mismo partido de tenis); como esto sí que es una contradicción, había que averiguar quién realmente tenía razón, es decir, cual de los dos había ganado. En la RE no pasa nada de esto.

La verdadera paradoja de los gemelos

Veremos ahora como se resuelve la "paradoja (aparente) de los gemelos". Si recordamos el viaje de A1 en su visita a A2, A1, que viajaba fijo al sistema B, tardaba 10 segundos (duración propia del viaje), mientras que en el reloj de A2 (fijo en A) habían pasado 20 segundos. Supongamos ahora que A1 decide hacer el viaje de regreso hacia su punto de partida (el extremo izquierdo de la vía), para compararse con su verdadero hermano gemelo A1' que ha permanecido todo el tiempo sin moverse de allí (en reposo respecto al sistema A). Y aquí es donde está la cuestión esencial.

Supongamos que una teoría (no la verdadera RE, sino una supuesta RE') predijese lo siguiente: "El viajero A1 se ha movido respecto a su gemelo sedentario A1'; por tanto, en su reloj debe haber transcurrido menos tiempo que en el de A1', y cuando se vuelvan a encontrar el sedentario A1' será más viejo que A1. Pero el viajero A1, que, excepto en el breve tiempo de aceleración, se ha movido siempre con velocidad constante respecto al sistema A, es equivalente al gemelo A1', que ha permanecido en reposo respecto al sistema A; por tanto, A1 y A1' son equivalentes. Luego A1' puede suponer que él es el viajero y en cambio A1 es el sedentario; entonces cuando se vuelvan a encontrar A1 será más viejo que A1'." Es decir la falsa teoría RE' predice que, en el momento del reencuentro, A1' será más viejo que A1 y que A1 será más viejo que A1': contradicción. ¿Qué pasará realmente cuando los dos gemelos se reencuentren?

Esta es la "paradoja de los gemelos", que es una contradicción para la falsa teoría RE', pero una paradoja aparente para la verdadera RE. Y hay que aclarar que, igual que ocurría en el viaje sólo de ida, si el tiempo usado en las aceleraciones es despreciable respecto al tiempo total del viaje, podemos prescindir de las aceleraciones y no necesitamos para nada la relatividad general; la paradoja se resuelve en el marco de la propia RE. Desde el punto de vista de la RE, ambos observadores A1 (viajero respecto al sistema A) y A1' (sedentario respecto al sistema A) no son equivalentes (ojo: los sistemas de referencia inerciales son siempre equivalentes, aunque no sean intercambiables; pero los observadores no siempre lo son; no confundamos observador con sistema de referencia): mientras que A1' es un verdadero observador inercial, pues permanece en reposo respecto al sistema inercial A (vía), A1 no se mueve como un observador inercial, sino como dos: en el viaje de ida se encuentra en reposo en el sistema inercial B (tren de ida), que se mueve respecto a A, en el sentido positivo del eje A, a una velocidad $+0,866 c$; pero después de decelerar y frenar, A1 salta y acelera para moverse solidario durante el viaje de vuelta en otro sistema inercial distinto C (tren de vuelta), que se mueve respecto a A con una velocidad negativa de $-0,866 c$, es decir, en sentido negativo al eje A. Y dos no son lo mismo que uno. De

nuevo despreciaremos el tiempo de deceleración, salto y nueva aceleración como muy pequeño en comparación con la larga duración del viaje, y mantendremos el análisis dentro de la RE.

Sabemos que el viaje de ida dura, en tiempo medido de A1, 10 segundos (el tiempo que mide con su reloj, igual al tiempo de envejecimiento real que experimenta el viajero), éste será el tiempo que midan para el viaje de ida los observadores de B, el sistema en que A1 permanece fijo durante el viaje de ida. Ya sabemos que este tiempo es la duración propia del viaje de ida, pues A1 inicia su viaje y lo termina en el mismo punto de B, y que a esta duración propia le corresponde una duración impropia de 20 segundos, que es la que se mide desde la vía A. Para el viaje de vuelta, en tiempo medido por el reloj de A1 el regreso ha de durar lo mismo que la ida, puesto que la distancia a recorrer en A y la velocidad respecto a A es la misma en módulo; es decir, la duración propia del viaje de vuelta es también de 10 segundos; pero este tiempo es el que se mide en el sistema C (tren de vuelta), sistema propio del viaje de vuelta, en el que A1 estará ahora en reposo sentado en su asiento. Sin embargo, como el tren de vuelta se mueve respecto a A a $-0,866 c$, a esta duración propia de 10 segundos le corresponderá una duración impropia medida por A de 20 segundos (en la correspondiente fórmula para hallar la duración impropia figura el cuadrado de v , así que en este caso no importa el signo). Luego la duración total del viaje, para el viajero A1, es de $10 + 10 = 20$ segundos; y para el gemelo sedentario A1', junto con todos los observadores de la vía, la duración total del viaje será de $20 + 20 = 40$ segundos. Cuando los dos gemelos vuelvan a encontrarse en el lugar original (extremo izquierda de la vía A), el sedentario A1' será más viejo que el viajero A1. No hay ninguna contradicción, sino una paradoja aparente, en realidad una falsa paradoja: hay un acuerdo total entre la RE y las películas de ciencia ficción, y si se realizase el experimento, concordaría seguro con la RE.

Así se resuelve la paradoja de los gemelos, y aquí debería acabar la discusión (aquí la acaban los libros de divulgación que la tratan con un mínimo de rigor). Pero por si no estás del todo convencido (y supongo que no lo estarás, pues debes haber leído algo parecido a esto en otros lugares), profundizaré un poco más en el análisis. Recapitulando, tenemos tres sistemas de referencia inerciales: el sistema A (vía), donde permanece fijo el gemelo sedentario A1', el sistema B (tren de ida), que viaja a velocidad $+0,866 c$ respecto a A, y el sistema C (tren de vuelta), que viaja a $-0,866 c$ respecto a A. Tenemos también tres acontecimientos, que llamaremos I (inicio del viaje), H (final del viaje de ida, media vuelta e inicio del regreso) y F (final del viaje completo y reencuentro entre los gemelos). Analizaremos la duración total del viaje para ambos gemelos (procesos IF e IF') usando sucesivamente los tres sistemas de referencia (sistema A, sistema B y sistema C), para ver si aparecen contradicciones. Nombraremos los procesos con prima si los mide el gemelo sedentario A1', y sin prima si los mide el viajero A1.

Desde el sistema A, calcularemos la duración del viaje de ida IH' medida por A1', el viajero sedentario, mediante la sencilla fórmula (válida también en RE) tiempo = espacio / velocidad = $17,32 \text{ seg-luz (medidos en A)} / 0,866 c = 20 \text{ segundos (medidos en A)}$. En el viaje de vuelta, la distancia recorrida es la misma en módulo, luego, el tiempo invertido será el mismo: $HF' = 20$ segundos. Luego la duración total del viaje para el gemelo sedentario es de $IF' = IH' + HF' = 20 + 20 = 40$ segundos. ¿Cómo calcularán los físicos de A la duración del viaje completo medida por el viajero? Se me ocurren dos maneras, una "mala" y otra "buena". El gemelo sedentario A1' podría razonar así: "yo me encuentro en reposo en el sistema inercial A, y los acontecimientos I y F ocurren en el lugar donde yo me encuentro; luego el proceso IF' (viaje completo) tiene como sistema propio el sistema A; por tanto, la duración $IF' = 40$ segundos que yo he medido es una duración propia; mi hermano gemelo A1 viaja a una velocidad de $0,866 c$ respecto a A (respecto a mí), luego a una duración propia de 40 segundos le corresponde una duración impropia de 80 segundos; por tanto, mi hermano A1 debe medir la duración del viaje como de 80 segundos, y cuando me reencuentre con él, él será más viejo que yo". Pero esto es contrario a todo lo que hemos dicho hasta ahora; en realidad, cuando se produzca el reencuentro F, el gemelo viajero A1 habrá envejecido sólo $IF = 20$ segundos.

¿Cuál es el error que ha cometido A1'? ¿Hay realmente una contradicción insoluble en la RE? Nada de eso. El error de A1' se encuentra en la suposición "mi hermano gemelo A1 viaja a una velocidad de $0,866 c$ respecto a A". Sabemos que esto es cierto sólo en la mitad del viaje; en la otra mitad, A1 viaja respecto a A a una velocidad de $-0,866 c$, es decir, en sentido contrario. Y aunque el sentido de la velocidad no importa para pasar de duraciones propias a impropias (pues v se encuentra en la fórmula elevada al cuadrado), sí que es importante tener en cuenta cuántos

sistemas tenemos y cómo se mueven para saber qué hemos de considerar como duración propia o impropia. Al razonar así, A1' no se está comparando con su gemelo A1, que realiza el viaje de ida y el de vuelta, sino con el viajero del tren B1, que comenzó el viaje junto a A1 y que continuó alejándose para siempre, y con otro reloj de B que pase por el lugar de A1' en el momento de F; es decir, con dos relojes de B, no con uno. Lo que está haciendo es calcular la duración del viaje completo medido en el sistema de referencia B, el cual sí que es cierto que viaja durante todo el proceso a $0,866 c$ respecto a A; pero esto ahora no nos interesa (sí que nos interesará algo más adelante, ya veremos). Lo que nos interesa ahora es lo que experimenta el verdadero A1, que viaja primero solidario al sistema B y después solidario al sistema C.

Veamos ahora el método "bueno". Para poder hablar de movimientos rectilíneos y uniformes, no hay más remedio que descomponer el viaje de A1 en dos partes: la ida IH y la vuelta HF. Y A1' no tiene más remedio que reconocer que, con esta descomposición, el proceso IH es un proceso propio del sistema B (I y H se producen en el mismo punto de B: el asiento del tren de ida), y que el proceso HF es un proceso propio del sistema C (H y F se producen en el mismo punto de C: el asiento del tren de vuelta; recordamos que consideramos el salto como instantáneo o de duración muy corta). Por tanto, aunque el proceso completo IF' observado por A1' (proceso que podemos llamar "espera" de A1') tiene una duración propia de 40 segundos (se trata de una duración propia, puesto que I y F ocurren en el mismo punto de A, donde está fijo A1'), estos 40 segundos son también la suma de dos duraciones impropias (20 segundos de IH' más 20 segundos de HF'), correspondientes a los procesos parciales "ida" y "vuelta", que ya no son copuntuales para A1' (en A), sino para A1 (sucesivamente, en los sistemas B y C), y es en esos sistemas B y C donde tenemos que tomar las duraciones propias de cada una de las mitades IH y HF. Ya hemos visto que, en cada mitad del viaje, la duración propia correspondiente a la duración impropia de 20 segundos es $IH = HF = 10$ segundos, y la duración total del viaje para el gemelo viajero A1 es $10 + 10 = 20$ segundos.

Analicemos ahora el viaje desde el sistema B (tren de ida). Sabemos ya que cada mitad del viaje dura 10 segundos para el viajero A1 y 20 segundos para el sedentario A1', y que el viaje completo dura 20 segundos para A1 y 40 segundos para A1'. ¿Como medirán los tiempos desde el sistema B? Desde luego, el viaje de ida lo realiza A1 sentado en un asiento de B, luego los de B medirán, exactamente, $IF = 10$ segundos. ¿Y el viaje de vuelta? Los físicos de B saben que, para A1, es idéntico al de vuelta, y por tanto durará también 10 segundos para A1, que ahora viaja en el sistema C (tren de vuelta); luego estos 10 segundos son la duración propia del viaje de vuelta FH, medida en C. Para calcular la duración impropia correspondiente medida en B debemos calcular primero la velocidad a la que se desplaza el sistema C respecto al sistema B. Para ello, hemos de usar la transformación de Einstein para las velocidades (Física, M. Alonso - E. Finn, p. 411, ec. 19.9, o de la edición antigua en tres volúmenes, ec. 6.37, vol. I, p. 141): $V' = (V - v) / (1 - vV/c^2)$, donde V' es la velocidad de C respecto a B, V es la velocidad de C respecto a A ($= -0,8660254 c$; tomaré este valor más exacto, que da un factor de conversión de 0,5, para evitar problemas de redondeo), v es la velocidad de B respecto a A ($= 0,8660254 c$) y c es la velocidad de la luz. Luego $V' = -(0,8660254 + 0,8660254) c / 1 + 0,8660254 \cdot 0,8660254 c^2/c^2 = -0,9897433 c$. Es decir, una velocidad negativa (hacia el extremo izquierdo de A) y menor que la de la luz, como debía de ser. Ahora debemos aplicar la fórmula de transformación de duración propia en impropia, $T = T' / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = 10 / [1 - (0,9897433 c)^2/c^2]^{1/2} = 70$ segundos. Luego el viaje de vuelta dura, medido por los observadores de B situados a lo largo del tren de ida, 70 segundos; esto es lo que observan realmente los de B, pero no tendrán ninguna dificultad para, a partir de este valor, invertir el último cálculo y deducir que la duración propia del viaje de vuelta (la que experimenta A1 y la que miden en C) es de 10 segundos. Luego la duración del viaje completo, experimentada por el gemelo viajero A1, es de $10 + 10 = 20$ segundos.

Por tanto, la duración total del viaje medida en B es de $10 + 70 = 80$ segundos. Esto es coherente con lo que habíamos deducido mediante el método "malo" usado cuando observábamos el viaje desde A; entonces deducimos que el viaje completo duraba 80 segundos medido desde B. Aquel cálculo que obtuvimos no era el que entonces buscábamos, no interesaba entonces, pero coincide con lo que hemos obtenido ahora, que sí que nos interesa.

¿Cómo calcularán los físicos de B la duración total del viaje IJ' que experimenta el gemelo sedentario A1', es decir, la duración total del viaje medida en A? Pues teniendo en cuenta que B se mueve respecto a A, durante todo el viaje, a $+0,866 c$ y que esta velocidad no cambia durante todo el viaje, para este cálculo podemos considerar el viaje IJ' como un proceso

completo; como los acontecimientos I y J (principio y final del viaje) se producen en el mismo punto de A, el viaje completo tendrá como sistema de referencia propio el sistema A, y la duración que mide en A y experimenta A1' es, para este cálculo, una duración propia (A1' está fijo en el sistema A durante todo el viaje del gemelo A1, luego para él el proceso IJ' es una "espera"; pero esto no es más que una cuestión de palabras). En cambio, la duración medida por B (80 seg) es una duración impropia. Hacemos los cálculos mediante la RE y obtenemos que la duración propia que corresponde a una duración impropia de 80 segundos, con una velocidad relativa de 0,866 c, son 40 segundos, y ésta será la duración total del viaje (o de la espera) medida en A y experimentada por el gemelo sedentario A1'. Que es lo mismo que habíamos obtenido anteriormente, cuando hicimos las mediciones en el sistema A.

No debe presentar ninguna dificultad admitir, como ya hemos explicado, que aunque los 40 segundos que dura el proceso IF' los considerábamos antes como suma de dos duraciones impropias, lo consideremos ahora una duración propia, puesto que antes lo subdividíamos en las dos mitades "ida" y "vuelta" ya que debíamos comparar con la experiencia sucesiva de A1 en dos sistemas diferentes B y C, mientras que ahora estamos considerando el proceso completo "viaje" o "espera", que es copuntual en el sistema A.

Y si analizamos el viaje desde el sistema C (el tren de vuelta), no nos sorprendamos si volvemos a encontrar otra vez lo mismo. Haré los cálculos y los comentaré de forma resumida. El viaje de ida dura 10 segundos para A1, que viaja en el sistema B (duración propia medida en B). La velocidad de B respecto a C es $V' = (V - v) / (1 - vV/c^2)$, donde ahora V' es la velocidad de B respecto a C, V es la velocidad de B respecto a A (= 0,8660254 c), v es la velocidad de C respecto a A (= -0,8660254 c) y c es la luz. Luego $V' = (0,8660254 + 0,8660254) c / 1 + 0,8660254 \cdot 0,8660254 c^2/c^2 = 0,9897433 c$. Aplicando ahora la fórmula de transformación de duración propia en impropia, $T = T' / (1 - v^2/c^2)^{1/2} = 10 / [1 - (0,9897433 c)^2 / c^2]^{1/2} = 70$ segundos. Ésta es la duración impropia que observan los de C para el viaje de ida, y ahora pueden calcular que el viaje de ida duró, en duración propia medida en B y experimenta por A1, 10 segundos. El viaje de vuelta lo hace A1 sentado en el asiento del tren de vuelta C, y por tanto los de C miden el tiempo directamente con su reloj: 10 segundos. Luego, igualmente, la duración del viaje completo experimentada por el gemelo viajero A1 es de 10 + 10 = 20 segundos. La duración total del viaje medida en C es de 10 + 70 = 80 segundos. Como C se mueve respecto a A, durante todo el viaje, a -0,866 c, y el inicio y el final del viaje son copuntuales al sistema A, en C saben que estos 80 segundos de duración impropia que ellos han obtenido corresponden a 40 segundos de duración propia del proceso "espera" experimentado por el gemelo sedentario A1'. De nuevo el mismo resultado.

Recapitulando, para los tres sistemas A, B y C (y para cualquier otro que decidamos usar), la duración del viaje para el gemelo viajero A1 es de 20 segundos, mientras que para el gemelo sedentario A1' es de 40 segundos. Los tres sistemas de observación calculan lo mismo, y no hay ninguna divergencia. El resultado que hemos obtenido es notable: aunque desde los distintos sistemas de referencia se observan cosas distintas (por ello ligados a ellos hay observadores diferentes), todos ellos pueden calcular, usando la RE, lo que observan los otros, y cálculos y observaciones coinciden. Es como si yo observo un coche a mi derecha, puedo "calcular" (deducir) que para alguien que está enfrente de mi el coche está a su izquierda. Los observadores A, B y C observan o deducen todas duraciones coherentes para los viajes de los gemelos: todos coinciden en que, transcurrido el viaje completo y a la hora del reencuentro, el gemelo sedentario A1' habrá envejecido 40 segundos, y el gemelo viajero, 20 segundos. No existe ninguna "paradoja de los gemelos", o, al menos, es una paradoja aparente. No hay ninguna contradicción en la RE, al menos hasta donde yo veo, y la RE es una teoría coherente.

Limpiando paradojas de debajo de la alfombra

Sin embargo, todavía hay dos cuestiones que hemos de resolver respecto a la paradoja de los gemelos. En primer lugar, podemos y tenemos derecho a preguntarnos cómo observa cada observador el movimiento del otro, es decir, qué verá cada uno de los gemelos si mira directamente al otro. ¿Observa realmente cada uno de ellos que el reloj del otro reloj retrasa? Esta pregunta es legítima, y yo me la planteaba algunas veces. El análisis del problema es complejo; hay que tener en cuenta que la observación mutua no es instantánea sino limitada por la velocidad de la luz; en el análisis del problema interviene un intercambio de señales mutuo, afectado por el movimiento relativo, donde hay que tener en cuenta el efecto Doppler relativista.

Yo he visto un análisis de este tipo en algún libro sobre RE, y la conclusión que se extraía era que no había contradicciones, y que la información obtenida por los dos observadores era coherente. Ahora no recuerdo los detalles, pero la conclusión es la que te he dicho: la frecuencia de los intercambios de señales disminuye cuando ambos gemelos se alejan y aumenta mientras se acercan, y al final, aunque el gemelo viajero envía menos señales que el sedentario (porque para él discurre menos tiempo), cada uno de ellos recibe las mismas señales que el otro envía; ninguna señal se pierde por el camino. Si te interesa el tema, dímelo, lo repasaré y te enviarte un resumen, o te indicaré la cita bibliográfica. De todas formas, el tratamiento del problema mediante el efecto Doppler no invalida mi explicación en base a duraciones propias e impropias, sino que es coherente con ella.

La otra cuestión es también delicada. Como tú dices en varios lugares de tu sitio, mucha gente (incluso algún que otro libro publicado), rehuye las dificultades de la paradoja de los gemelos diciendo que "el viaje de los gemelos no es simétrico, porque uno de los gemelos sufre aceleraciones y el otro no, y como la RE no trata de movimientos acelerados, la paradoja sólo se soluciona mediante la relatividad general (RG). Veamos que hay de cierto en todo ello, y si todo esto es compatible o no con la explicación que yo he dado.

En primer lugar, tienes razón al decir que no es exacto que la RE no pueda tratar con movimientos acelerados. La RE puede tratar con movimientos acelerados de los objetos, siempre que el (o los) sistema de referencia en que midamos las aceleraciones sea inercial. Por eso hay ecuaciones de transformación también para aceleraciones. Para lo que se muestra insuficiente la RE es para transformar informaciones (como posiciones, instantes de tiempo, duraciones o longitudes) entre sistemas de referencia uno de los cuales acelere respecto al otro. Para eso está la relatividad general. No obstante, muchos problemas que implican sistemas en movimiento relativo acelerado se pueden tratar aproximando el movimiento del sistema acelerado mediante una suma de movimientos rectilíneos y uniformes, aplicar entonces la RE, pasar al límite (quizá calculando una integral) y comprobar si el resultado obtenido está de acuerdo con el predicho por la relatividad general.

Por otra parte, como ves yo no creo que la RE tenga contradicciones que deba resolver la RG. Si la RE tuviese contradicciones, éstas serían heredadas por la RG, pues ésta se reduce a aquélla cuando no hay aceleraciones mutuas entre los sistemas de referencia ni campos gravitatorios. La RE se basta por sí sola para resolver sus problemas, y no necesita de la RG más que en los campos en que aquélla no es aplicable.

Dicho esto, donde yo sí que creo que tienen razón es en la primera parte de la afirmación: "el viaje de los gemelos no es simétrico, porque uno de los gemelos sufre aceleraciones y el otro no". ¿Es esto compatible con mi explicación? Yo he "despreciado" las aceleraciones suponiendo que su duración es muy corta respecto a la duración total del viaje; sin embargo, esto no quiere decir que las aceleraciones no existan. De hecho, en el caso que he analizado (duración muy corta del periodo de aceleración y de frenado), las aceleraciones deben ser formidables, para conseguir un arranque, una media vuelta y una frenada casi instantáneos. Estas aceleraciones sólo las sufre el gemelo viajero, pero no el sedentario, y por ello es cierto que el viaje de los dos gemelos no es simétrico. Yo las he obviado haciendo que el viajero "saltara" instantáneamente desde la vía al tren de ida, desde este al tren de vuelta, y desde este de nuevo a la vía, pero lo que he hecho en realidad es seguir el método que describí antes para tratar con movimientos acelerados: descomponer el movimiento del sistema acelerado en movimientos rectilíneos y uniformes, y luego sumar los resultados parciales. Luego mi explicación de la paradoja haciendo que el viajero viajase en dos sistemas de referencia distintos (tren de ida y tren de vuelta), mientras el sedentario permanecía en reposo en un sólo sistema (vía) es equivalente a decir "uno de los gemelos sufre aceleraciones y el otro no". El efecto de las aceleraciones es, precisamente, hacer que el viajero cambie de sistema. Las dos explicaciones son, pues, la misma (o equivalentes).

Si la duración de las aceleraciones fuese apreciable (lo que ocurre, por ejemplo, en los movimientos curvilíneos), lo que haríamos es, como he dicho, descomponer el movimiento en numerosos, quizá infinitos fragmentos "rectilíneos y uniformes". El resultado, cualitativamente hablando, sería el mismo: en cada uno de los fragmentos el gemelo viajero mediría una duración propia que siempre sería inferior a la duración impropia que mediría el gemelo sedentario, y sumando estas duraciones (quizá mediante una integral curvilínea) sobre todos los fragmentos nos daría el resultado conocido: el gemelo viajero envejece menos que el gemelo sedentario.

Si decidimos tratar los movimientos acelerados mediante la RG, el resultado es idéntico: por el principio de equivalencia, una aceleración es equivalente a un campo gravitatorio. Según la relatividad general, la duración propia de los procesos en presencia de un campo gravitatorio es menor que la del mismo suceso sin campos gravitatorios (recuerda el ejemplo del astronauta que se aproxima a un agujero negro). El resultado, por tanto, es el mismo: la duración del viaje para el gemelo viajero es siempre menor que para el gemelo sedentario.

Todavía hay un punto que conviene aclarar: hemos visto que los relojes en sistemas acelerados marcan duraciones propias más cortas que los relojes no acelerados, y esto tanto si hacemos el análisis por la RE como por la RG. Sin embargo, esto no quiere decir que las aceleraciones produzcan el retraso de los relojes, ni que el retraso se produzca durante el tiempo en que duran éstas. Si así fuera, tú tendrías razón al plantear que en una aceleración casi instantánea no se podría producir un desfase grande, y que una misma aceleración no podría producir desfases de tiempo diferentes en función de la duración del viaje. En el análisis desde el punto de vista de la RE (el que yo he hecho para resolver la paradoja de los gemelos), lo que las aceleraciones producen es el "salto" entre los sistemas de referencia; el hecho de que haya aceleraciones (aunque sean instantáneas) nos impide usar un único sistema de referencia (la vía), y el hecho de que haya giro (más aceleraciones aún) nos obliga a usar dos sistemas de referencia para el viajero (el tren de ida y el de vuelta); ello (el cambio de sistemas de referencia) hace que nos veamos obligados a hablar de movimiento relativo y de duraciones propias e impropias (éste análisis vale también para el viaje sólo de ida; el hecho que A1 se acelere y luego se frene produce la situación no simétrica que hace que, al moverse A1 sobre la vía, hayamos de introducir dos relojes para medir la duración impropia de su viaje en la vía; además, si hay giro y viaje de vuelta, hemos de introducir un tercer sistema, que es el que produce la asimetría entre gemelo viajero y gemelo sedentario cuando se reencuentran). Ahora bien, una vez producido el salto de un sistema a otro a causa de la aceleración, evidentemente, cuanto más dure el viaje más grande será el desfase originado por la diferencia entre duración propia e impropia.

Los movimientos rotatorios

En el ejemplo que tu citas del artículo de 1905, Einstein usa el método que yo he escrito para movimientos acelerados (o curvilíneos): el movimiento del sistema ligado al reloj del ecuador se aproxima mediante una línea poligonal. Si definimos una serie de sistemas inerciales (uno para cada lado de la poligonal) que se mueven solidarios con el reloj del ecuador, en cada lado de la poligonal el tiempo que registra este reloj es la duración propia correspondiente, pues el reloj está en reposo sucesivamente en cada uno de los sistemas. Para cada lado del polígono, la duración del tránsito que mida el reloj del polo será una duración impropia (en sentido estricto, para medir ese tiempo habría que situar dos relojes en reposo respecto al polo, que no girasen con la Tierra, uno al principio y otro al final de cada segmento). Luego si, para la vuelta completa sumamos todos los tiempos propios del reloj del ecuador, y todos los tiempos impropios medidos por el reloj del polo, evidentemente la suma realizada en el polo será mayor que la suma realizada en el ecuador, y la duración total de giro medido por el reloj del polo será mayor que la medida por el reloj del Ecuador.

Hay que aclarar enseguida que Einstein consideraba este resultado como una paradoja-extrañeza, es decir, como un fenómeno extraño totalmente nuevo respecto a lo que era conocido en la época; él lo llama "llamativa consecuencia". Pero Einstein no lo consideraba una contradicción; él (ni nadie) no hubiera publicado conscientemente un artículo que contuviese contradicciones, y si lo hubiera hecho, nadie le hubiera hecho caso, o, al menos, la comunidad científica no lo hubiera admitido como uno de los artículos fundamentales de la historia de la ciencia.

El experimento del avión, o de cualquier viaje circular de un gemelo, mientras que el otro permanece en reposo en un sistema inercial, es semejante a este: siempre el gemelo viajero envejece menos que el gemelo sedentario.

Si analizamos estos ejemplos mediante la relatividad general, obtendremos el mismo resultado: el movimiento circular implica que el objeto que se mueve está sometido a una aceleración centrípeta. Y como ya he dicho para el ejemplo de los gemelos, la aceleración

equivale a un campo gravitatorio, lo que implica una duración propia menor para el sistema acelerado.

Cualitativamente hablando, este resultado es generalizable para movimientos acelerados en general. Si una de las aceleraciones es pequeña y la otra grande, envejecerá más el gemelo que menos aceleró (pues el que menos aceleró está más próximo a un sistema inercial); pero si las aceleraciones son idénticas, aunque sean en sentido contrario, los retrasos serán idénticos y el envejecimiento cuando se encuentren, el mismo.

Veamos algunas variantes que tú planteas en tu página:

<http://www.geocities.com/newmodel2k/Gemelos.htm>

En el ejemplo 1, si los dos gemelos parten en direcciones opuestas y uno realiza el mismo viaje que el otro, pero invertido en el espejo, entonces, cuando se encuentren, los dos habrán envejecido lo mismo (y, por supuesto, los dos mucho más que el otro hermano trillizo que quedó en la Tierra).

En el ejemplo 2, los aviones realizan órbitas en sentido opuesto. Para analizar este problema dentro de los límites de la RE, no podemos usar el sistema ligado a uno de los aviones como observador, ya que ambos se mueven en órbitas circulares, y ninguno de ellos es un sistema inercial. Elijamos, pues, un sistema de referencia con el origen en el centro de la Tierra, y que no gire con ésta. Cada uno de los aviones realiza una órbita circular, luego, tal como hemos visto antes, el reloj de cada uno de ellos marcará menos tiempo que el reloj fijo en el centro de la Tierra. El desfase global será el mismo para ambos relojes, ya que, aproximando la órbita mediante segmentos de poligonal muy pequeños, en el cálculo de la duración propia en cada segmento sólo interviene el cuadrado del módulo de la velocidad relativa; no importa, pues, la dirección del giro. Así pues, si prescindimos de los eventuales efectos derivados de la presencia de la Tierra, el retraso de los relojes en las dos órbitas debe ser idéntico, pero los dos retrasarán respecto a un reloj que permaneciese inmóvil en el centro de la Tierra. Cuando los gemelos se vuelvan a encontrar después de realizada una vuelta y se miren a través de las escotillas, verán que los dos han envejecido lo mismo. Y si te lo que planteas es cómo observa cada uno el reloj del otro durante el viaje, recuerda lo que dije antes: observaciones limitadas por la velocidad de la luz, intercambio de señales, efecto Doppler relativista, etc., todo ello complicado porque ahora el movimiento no es rectilíneo, sino circular. Pero el resultado final debe ser coherente con lo dicho; ten en cuenta que durante la mitad del trayecto los móviles se alejan y durante la otra mitad se acercan, y que el alejamiento y el acercamiento son simétricos, luego los efectos Doppler de ambas mitades del recorrido sobre el intercambio de señales deben cancelarse. No hay aquí tampoco ninguna contradicción.

Después de escribir esto, me di cuenta de que los resultados que yo propongo coinciden con los que tú das en tu página

<http://www.geocities.com/newmodel2k/Rotatorios.htm>

sólo que parece que tú crees que sólo son válidos para movimientos "reales" respecto a un sistema MRLE. Yo creo que no, que según la RE serían igualmente válidos para movimientos respecto a cualquier sistema inercial. Hemos visto antes que para el caso sencillo las paradojas se resuelven dentro de la misma RE midiendo los tiempos respecto a cualquier sistema inercial. Y, además, después de todo, tú no sabes cuál es el MRLE. ¿Cómo predecirás con tu teoría los resultados si el movimiento es respecto a un sistema inercial cualquiera, que no sea MRLE? Volveré sobre esto más adelante.

Volviendo al ejemplo 2 (aviones que dan la vuelta a la Tierra en sentido este-oeste y oeste-este), antes he dicho "si prescindimos de los eventuales efectos derivados de la presencia de la Tierra". Hay que tener en cuenta que en el experimento real la comparación se hizo entre el reloj de los aviones que vuelan y el que se queda en el aeropuerto, y no con un reloj hipotético en el centro de la Tierra. ¿Cuáles son los efectos de la presencia de la Tierra? En primer lugar, el efecto del campo gravitatorio de la Tierra, que en un experimento sensible no se puede obviar. Y aquí sí que entra ineludiblemente la relatividad general, pues según ésta un campo gravitatorio influye sobre el comportamiento de los relojes. Este efecto depende de la altura de los relojes. Además hay que tener en cuenta que la Tierra gira en sentido oeste-este, y con ella el reloj que quedó en el aeropuerto. Luego no puede extrañarnos que el reloj del avión que voló hacia el oeste midiese distinto tiempo que el que voló hacia el este. En el experimento realizado realmente en 1971 se

usaron relojes que viajaron en aviones comerciales e incluyó diversos trayectos con sus escalas, a diferentes altitudes, latitudes, y direcciones de vuelo, durante tres días. Una vez analizados los registros de los dos viajes globales y las lecturas de los relojes, se comprobó que, dentro del error experimental previsible, los resultados coincidían con las predicciones realizadas por la RG. Aquí no estamos hablando de relatividad general, pero hay que señalar que ésta es coherente con la RE, incluye paradojas-extrañezas todavía más fuertes que las de la RE, pero sus predicciones han sido también comprobadas por todos los experimentos realizados.

Respecto a lo que tú afirmas bajo el epígrafe "Segundo análisis", en contra de lo que tú afirmas, el hecho de que dos sistemas se muevan uno con respecto al otro no implica que ninguno de los dos haya sido acelerado nunca, siempre que el movimiento relativo sea rectilíneo y uniforme; esto es la definición de aceleración. Por otra parte, los sistemas no se "cruzan", se cruzan los objetos materiales. Evidentemente, todos los objetos del Universo están sometidos a fuerzas (y por tanto a aceleraciones mutuas), pero, ¿qué tiene eso que ver con que podamos definir o no sistemas de referencia inerciales? Los sistemas de referencia se definen mediante un punto que sirve de origen, tres ejes, y un momento origen del tiempo. De acuerdo en que los sistemas ligados a objetos materiales no son nunca exactamente inerciales; pero el concepto de "sistema inercial" es un concepto matemático, y un sistema ligado a objetos reales se acepta como aproximadamente inercial si en él se verifican las leyes de Newton con la aproximación suficiente para el experimento de que se trate. Pero es que toda la física funciona así: mediante modelos matemáticos de los cuales la realidad física es siempre una aproximación. Repito, todos los objetos del universo están sometidos a fuerzas mutuas, ninguno ha estado libre de aceleraciones, luego me siento tentado a concluir, en tus mismos términos, que no hay ningún objeto privilegiado en el sentido que tú le das aquí. Pero es que no tiene nada que ver una cosa con la otra.

Respecto al lío de los relojes en las plataformas giratorias, ten en cuenta que la única manera de usar como primera aproximación la RE en sistemas giratorios es aproximando el movimiento circular por un número grande de recorridos rectilíneos uniformes en forma de polígono. Es para cada uno de estos segmentos rectilíneos (prolongados, si hace falta, como rectas infinitas) donde habría que dibujar los relojes que adelantan y retrasan, pero no en el círculo completo, ya que al cambiar de segmento, el móvil cambia de sistema de referencia inercial, de la misma manera que hemos visto para el giro en el viaje de uno de los gemelos. Los relojes adelantados y retrasados de una recta (sistema inercial) nunca se encuentran, excepto en el caso de una recta que diese toda la vuelta en un universo cerrado...; pero en ese caso no podrías evitar tener que usar la relatividad general (en forma de cosmología relativista), y ahí sí que me pierdo.

Un ejemplo real: los mesones relativistas

Veamos ahora brevemente un ejemplo real: los rayos cósmicos que provienen del espacio exterior, al chocar con las moléculas situadas en la parte superior de la atmósfera producen la ionización de éstas y originan partículas inestables (mesones, con un período de semidesintegración muy corto). Si no tuviésemos en cuenta la RE, la mayor parte de estos mesones se desintegrarían antes de llegar a la superficie de la Tierra y no podrían ser detectadas. ¿Como es posible que estas partículas lleguen a los detectores en cantidades apreciables?

Introduzcamos dos sistemas de referencia, uno ligado al laboratorio (a la Tierra), y otro ligado a la partícula, los dos aproximadamente inerciales, y podemos considerarlos así en primera aproximación. En el sistema laboratorio la distancia que recorren los mesones es una longitud propia (la anchura de la atmósfera); sin embargo, en el sistema ligado a la partícula la distancia a recorrer es una longitud impropia (mucho menor que la anchura de la atmósfera medida usualmente en la Tierra), ya que la partícula se mueve muy rápidamente respecto a la atmósfera (o la atmósfera se mueve respecto a la partícula, lo que es lo mismo). Pero el periodo de semidesintegración de una partícula se mide con la partícula en reposo, es decir, en un sistema de referencia en que la partícula esté en reposo relativo; o sea, será una duración propia en el sistema de la partícula, mucho menor que la duración impropia del viaje medida desde el laboratorio. Si analizamos el viaje desde el sistema del laboratorio, la longitud propia de la atmósfera (grande) será igual al la duración impropia (grande) por la velocidad de la partícula (próxima a la de la luz). Desde el sistema de la partícula, la distancia a recorrer, longitud impropia (pequeña) será igual al periodo de semidesintegración (pequeño) por la velocidad de la partícula. Pero en ambos casos los resultados observables coinciden: gracias a la dilatación del

tiempo (periodo de semidesintegración) o a la contracción de la longitud (atmósfera) (y en cada uno de los análisis desde cada sistema usaremos una u otra de las alteraciones, según sea la duración impropia o la longitud impropia la que intervenga), un número apreciable de mesones llegan a los detectores.

En el experimento real se compararon los mesones que se registraban en una montaña de 2.000 metros con los que se registraban a nivel del mar (en caso contrario, no habría manera de comparar los mesones que se registran en la superficie de la Tierra con los que realmente se producen). Sin la RE, la mayor parte de los mesones que llegan hasta los 2000 metros se desintegrarían antes de llegar a nivel del mar. Sin embargo, en la realidad se registraba a nivel del mar un porcentaje muy alto de los que se registraban a 2.000 metros. Teniendo en cuenta las energías de los mesones supervivientes, los resultados coincidieron plenamente con las predicciones de la RE.

¿Son realmente necesarios los MRLE?

Analizaré ahora con más detalle tu teoría alternativa sobre los MRLE. En primer lugar, si como tú mismo afirmas esta teoría usa las mismas ecuaciones y genera el mismo resultado que la RE, habrá que admitir que, teniendo en cuenta que las predicciones sobre la realidad son las mismas en ambas teorías, si en la MRLE no hay paradojas-contradicciones, en la RE tampoco debe de haberlas (si las consecuencias observables de la teoría MRLE son coherentes, y las de la RE son idénticas, entonces éstas también deben ser coherentes). Hemos visto que en la RE no hay contradicciones, o al menos yo no las he visto. ¿Para qué hablar de un sistema privilegiado que no es posible definir, si con los sistemas relativos de la RE todo cuadra? Pero veremos que pretender destacar un sistema privilegiado (digamos, en reposo absoluto), para intentar resolver las supuestas paradojas de la RE, es, en mi opinión, conceptualmente inadecuado.

Tú afirmas que para resolver la paradoja de los gemelos y convertirla en una paradoja aparente es preciso afirmar que existe un sistema de referencia privilegiado, en el cual podemos medir movimientos absolutos. Para ti, las observaciones en el sistema A son reales, y en el sistema B sólo aparentes. Pero, ¿aparentes para quién? Para los observadores de B las observaciones hechas en B son plenamente reales, tanto que no pueden darse cuenta de si son "realmente" reales o no (en el sentido que tú le das a "real"); en cambio, las de A serían para ellos aparentes. Igualmente, los observadores de A tampoco pueden estar seguros de si sus observaciones son las verdaderamente reales o no: ¡Ellos tampoco saben que son reales! ¿Qué derecho tienen los de A por encima de los de B? ¿Quién decide cuál es el sistema que realmente observa la "realidad"? Como en la realidad no es posible tu fotografía "mágico", no hay manera de saber quién está "realmente" en reposo y quien se mueve "realmente". Parece que concluimos que el sistema A y el B, y todos los que se muevan con movimiento rectilíneo y uniforme, son equivalentes.

Veámoslo de otra manera. Elegimos (no se sabe con qué criterio) un sistema como MRLE, por ejemplo, aquél en que nos movemos nosotros (suponiendo que fuéramos un sistema de referencia inercial). Ya tenemos resueltas las "paradojas" de la RE. Pero si hubiésemos elegido otro sistema cualquiera como MRLE (por ejemplo, uno que viaje a $0,866c$ respecto de nosotros), y hubiésemos supuesto que somos nosotros los que nos movemos, las predicciones sobre experimentos reales que hubiésemos realizado serían las mismas. Luego cualquier sistema inercial, elegido como MRLE, nos sirve. Es decir, todos los sistemas inerciales son equivalentes, en contra de tu suposición.

Es necesario aclarar que esto no es aún una contradicción, pues estoy usando el término "sistemas equivalentes" en dos sentidos ligeramente diferentes. Es perfectamente posible que haya un sistema inercial "privilegiado", respecto al cual sea realmente posible definir algo que podemos considerar si queremos como velocidades absolutas (más adelante veremos que, efectivamente, este sistema realmente existe, o más bien una colección infinita de ellos; lo llamaremos de momento "sistema de referencia comóvil con la radiación de fondo del universo", SRCRFU). En este caso, si admitimos la posibilidad de definir este sistema, en el sentido de la definición que hagamos los demás sistemas no serán "equivalentes" a este. Pero en el sentido que le da la RE, todos los sistemas inerciales son equivalentes. Para hablar con más propiedad, habría que decir que, según la RE, todos los sistemas inerciales (aquellos en los que se cumplen las leyes de Newton del movimiento) son invariantes para las leyes físicas; es decir, en todos

ellos se verifican las mismas leyes físicas, y en particular todos ellos coinciden en lo que respecta a duraciones y longitudes propias de los objetos y los procesos (las magnitudes propias son invariantes, es decir, son idénticas para objetos idénticos y para procesos idénticos en cualquier sistema). Por tanto, no es posible distinguir entre ellos ningún sistema "especial" como tu MRLE (excepto por lo que respecta al fenómeno de la radiación de fondo de microondas, que define los sistemas SRCRFU).

Estaría ahora por ver (o mejor dicho, tú deberías aclarar) si tu MRLE coincide o no con un SRCRFU). Supongamos por un momento que sí. Entonces, si tú quieres llamar "reales" a las longitudes y duraciones que se miden en un SRCRFU, y "aparentes" a las que se miden en cualquier otro sistema inercial, pues no hay problema; es una cuestión de definición. Pero ahora en seguida te argumentaré sobre lo inadecuado de esta definición sobre lo que es "real".

Por ejemplo, en tu análisis del "experimento recíproco", en que B2 viaja hacia la posición de B1, supones (de manera arbitraria, a mi entender) que el sistema A es un MRLE, y dices que " B1 y B2, están realmente (Fig. 1) separados por 8.66 seg-luz. Sin embargo creen (luego de "sincronizar" sus relojes en base a la "constancia" de la velocidad de la luz) que están separados por 17.32 seg luz". Pero realmente B1-B2 es la longitud de un objeto fijo en el sistema B (por ejemplo, el vagón de un tren), y la medida que de él hacen los observadores de B es una longitud propia. Se trata de una cantidad fija que desde el tren siempre la medirán igual, aunque el tren acelere, reduzca la velocidad o se pare: para los del tren, el vagón siempre medirá 17,32 seg-luz. Sin embargo, tú dices que esta longitud del vagón (17,32 seg-luz) es "aparente", y que la "real" es de 8,66 seg-luz. Pero si el vagón se desacelera y viaja a una velocidad menor, su longitud "aparente" seguirá siendo la misma (17,32 seg-luz), mientras que su longitud "real" cambiará. Sólo si el vagón se llega a parar del todo, su longitud "real" llegará a ser igual a la "aparente", que es la que de verdad no ha cambiado. La longitud "real" es variable, mientras que la "aparente" es la que permanece fija. Curioso, ¿no?

Pero si hacemos el análisis respecto a objetos naturales reales, la "curiosidad" se hace más escandalosa. Veamos, por ejemplo, la medida de un átomo de hidrógeno, que podemos tomarla como el radio de la primera órbita electrónica estable o radio de Bohr: 0,529 A. Este radio se calcula y se mide para un sistema de referencia en que el átomo esté en reposo (longitud propia, en la RE), y depende de delicados equilibrios entre las fuerzas que intervienen, y otras cuestiones complicadas de la mecánica cuántica. En cualquier sistema de referencia inercial en que calculemos y midamos el radio de "Bohr" encontraremos la misma medida: 0,529 A., y ello sirve para cualquier medida fundamental que realicemos (por ejemplo, la velocidad de la luz). Por ello se dice que las leyes de la física son invariantes para todos los cambios de sistemas de referencia inerciales, es decir, las mismas para todos los sistemas. Esto es el mismísimo "principio de relatividad". Pues bien; según tú, si el átomo se encuentra en un sistema de referencia que viaje respecto a un indeterminable MRLE, esta medida fija e invariante (0,529 A) no es "real" sino "aparente"; y como no sabemos cual es el auténtico sistema MRLE, no podemos saber cuál es la medida real del átomo de Bohr.

Y si consideramos el tiempo, lo mismo, pero más grave. El segundo, como unidad de tiempo del sistema fundamental de medidas en física, se define como el lapso de tiempo en el cual se producen 9192631770 oscilaciones de la radiación emitida por una cierta transición de un electrón de un átomo desde una determinada órbita a otra. Pero claro, todo esto en un sistema de referencia inercial cualquiera (para las Conferencias de Pesos y Medidas, que sí que aceptan la RE, todos los sistemas de referencia son equivalentes, y todos medirán el mismo periodo para dicha radiación: duración propia). Tú también aceptarías, creo, que todos los sistemas inerciales miden el mismo periodo para esta radiación, pero tú nos dices que este periodo no es "real", sino sólo "aparente"; que el verdadero periodo "real" no lo sabemos, ni lo podemos saber, puesto que no podemos reconocer cuál es el verdadero MRLE. Tú corregirías a la Conferencia de Pesos y Medidas y definirías un "segundo aparente", pero no podrías definir el segundo real. Cuántas oscilaciones se producen en realidad en un segundo "real", no lo sabemos ni lo podemos saber, puesto que no podemos saber cuantos segundos reales dura en realidad nuestro "segundo aparente".

Francamente, si tú deseas mantener tu definición de lo que es "real" y lo que es "aparente", debes admitir que tu definición nos lleva a algunos juegos difíciles de aceptar. Yo, si he de asignar algún sentido a la palabra "real", preferiría asimilarla a la "longitud propia" de un objeto o

a la "duración propia" de un proceso (o "masa en reposo", etc.), que permanecen constantes en sus sistemas propios se muevan éstos como sea. Y ello con todas las reservas, ya que los conceptos "real" y "aparente" no tiene ningún significado en la RE (al menos, no el que tú le das). En realidad para mí (y creo que para la mayoría de los físicos que aceptan la RE), todas las medidas son igual de reales, sólo que las "propias" son invariantes.

Pero yo creo que el uso que tú le das a la palabra "real" es una simple cuestión de definición. Si en tu discurso cambias "real" por "medido en el sistema A" (o bien en tu MRLE, o en un SRCRFU), y "aparente" por "medido en el sistema B" (cualquiera que éste sea), todo cobra de repente sentido: las longitudes propias de los objetos idénticos y las duraciones propias de los mismos procesos son medidas igualmente en los sistemas en que son propias (sean estos MRLE, SRCRFU o no), mientras que en los otros sistemas (no propios) las medidas de las duraciones y longitudes se transforman según las transformaciones de Lorentz, y todo cuadra.

Parece que tú prefieres fijar un sistema que supones como MRLE para poder entender mejor las "paradojas-extrañezas" de la RE. Si es así, y a ti te sirve, pues nada que objetar. Pero con esto introduces unos conceptos ("real", "aparente") a mi entender inadecuados y que embrollan más que aclaran; pero, sobre todo, no creo que resuelvas con ello ninguna "paradoja-contradicción" en la RE, pues, hasta donde yo veo, éstas no existen.

Pero, con tu hipótesis de MRLE, introduces otras paradojas-extrañezas, para mí más graves todavía que las de la RE: ¿Cuál es el mecanismo por el cual los objetos se acortan "realmente", y los procesos se ralentizan "realmente"? ¿Cómo es que los sistemas que no son MRLE observan, de manera "aparente", la misma velocidad de la luz, c , que los MRLE? ¿Qué significa eso de que la velocidad de la luz "aparenta" ser constante (pues la velocidad de un móvil, en un sistema de referencia, se define como el espacio recorrido por el móvil en ese sistema, dividido por el tiempo medido también en ese sistema; si la luz recorre, en un cierto sistema inercial, una varilla de 300.000 Km al mismo tiempo que pasa un proceso que, en ese sistema, dura un segundo, su velocidad será "realmente" c , y no "aparentemente", independientemente de que en otro sistema la misma varilla y el mismo proceso los midan de forma diferente, y independientemente de cual medida adjetivemos como "real")? Además, la velocidad de la luz se deduce directamente de las ecuaciones de Maxwell, que son ni más ni menos que las leyes del electromagnetismo, dando el valor $c = (1/\epsilon_0\mu_0)^{1/2}$. Si afirmas que en cualquier sistema inercial que no sea tu MRLE la velocidad de la luz es c sólo de manera aparente, lo que estás diciendo realmente es que las leyes del electromagnetismo (y por extensión, las de toda la física), se cumplen sólo de manera aparente; ¡pero todos los cálculos que hacemos con ellas sobre los resultados de los experimentos se pueden verificar mediante la observación!! Esto es muy difícil de admitir; prefiero pensar que las leyes de la física se cumplen "realmente" en todos los sistemas inerciales, puesto que concuerdan con los experimentos; lo contrario es un juego de palabras.

En diversos lugares de tu sitio sugieres que pudiera suceder que en los sistemas de referencia que no son el MRLE la velocidad de la luz en el viaje de ida no fuera igual a la del viaje de vuelta. Veamos: la suposición de Einstein de que las velocidades de ida y de vuelta son las mismas se basa implícitamente (aunque Einstein no lo menciona explícitamente) en las hipótesis de la homogeneidad e isotropía del espacio; estas hipótesis son usadas implícitamente, o enunciadas explícitamente, junto con los dos principios de la RE, en todos los textos para deducir las transformaciones de Lorentz y las demás consecuencias de la RE. Estas hipótesis implican que todos los puntos del Universo y todas las direcciones son equivalentes, es decir, las leyes de la física que observaremos y aplicaremos son las mismas si hacemos un experimento en la Tierra que en la galaxia M51, y las mismas si miramos en la dirección de Sagitario que en la de Hércules. Claro, si miramos en la dirección de Sagitario, nos tropezaremos con el centro de nuestra galaxia, y lo que observaremos será diferente que en cualquier otra dirección, y si vamos a M51 no sabemos si podremos siquiera desplegar los instrumentos en algún lugar tranquilo y confortable. Pero eso se debe a irregularidades locales que no enturbian la hipótesis general: las leyes de la física son las mismas. Estas hipótesis se dan por supuestas no sólo en la RE, sino también en todas las ramas de la física (por ejemplo, en muchas deducciones, cuando se dice "por simetría...", "teniendo en cuenta la simetría circular del problema...", etc.), y concretamente en el electromagnetismo; más concretamente, la velocidad de la luz deducida de las ecuaciones de Maxwell, $c = (1/\epsilon_0\mu_0)^{1/2}$, es la misma en cualquier dirección, de ida, de vuelta y de ida y vuelta. Si pretendes mantener que la velocidad de la luz en el viaje de ida es diferente a la de

vuelta, estás cuestionando, no sólo la RE, sino toda la física (y, en mi opinión, el sentido común, que ya sé que es el menos común de los sentidos, pero, en este caso...).

Por cierto, no he leído con detalle tus propuestas de experimentos para decidir entre RE y MRLE. Espero que me disculpes por ello. No me atraen nada los artilugios mecánicos complicados, "cosa de ingenieros"; prefiero los problemas físicos sencillos, sobre todo los que se refieren a cuestiones fundamentales. Tengo que confesar que uno de los aspectos de la RE que más me costó digerir en su día fue precisamente los detalles del experimento de Michelson-Morley; durante mucho tiempo preferí aceptar el resultado sin entretenerme en detalles, y sólo después, cuando llegué a tener algunos conocimientos de óptica, me decidí a sumergirme en el dichoso interferómetro con sus franjas de interferencia y demás chismes para entenderlo por una vez... y olvidarlo rápidamente para siempre. Si yo fuese físico profesional, preferiría ser físico teórico antes que físico experimental. De todas formas, sinceramente pienso que los experimentos que propones no deben funcionar, y ello por las siguientes razones: si tú mismo dices que admites las matemáticas de la RE, las conclusiones observables de tu MRLE, si están bien planteadas, deben ser las mismas que las de la RE. Máxime cuando, como yo creo, cualquier sistema inercial sirve para ser tomado como MRLE. Además, tú mismo admites que c es constante, aunque sea "aparentemente", en todos los sistemas inerciales; pues bien, esa constancia de c , aunque aparente, debe ser exacta, y por tanto no debe ser posible observar desviaciones. Por estos motivos, no puede existir ningún artilugio complicado para "medir" una velocidad de la luz que no sea exactamente c , y menos aún una velocidad de la luz que cambie con la dirección del movimiento. Además, cualquier artilugio de este tipo deberá funcionar según las leyes de la física, y éstas implican, como hemos visto, la independencia de c de la dirección de movimiento.

A parte de todo esto, y como conclusión, o yo no lo he entendido muy bien, o, si realmente hubiese contradicciones en la RE, con tu propuesta de MRLE no las resuelves. Mientras que en algunos lugares de tu sitio afirmas que las consecuencias de la RE son las mismas que las de la teoría MRLE, mientras que en otros casos parece que la teoría MRLE sólo se aplica a movimiento respecto a los MRLE, y no para movimientos respecto a sistemas inerciales en general. Veamos: tú dices que, si consideramos movimientos respecto a un sistema inercial cualquiera, la RE produce contradicciones. Sin embargo, si el movimiento es respecto al MRLE, no hay contradicciones. Pero entonces, ¿cómo analizas con tu teoría de los MRLE los movimientos respecto a un sistema inercial cualquiera que no sea MRLE? ¿Qué predice tu teoría en este caso? ¿O es que la teoría MRLE sólo se aplica a movimientos respecto a un MRLE? Yo creo, que tú, como todo el mundo, ves paradojas-extrañezas en la RE (igual que yo), es decir, fenómenos a los que no estamos acostumbrados porque escapan a nuestra experiencia cotidiana; pero no verdaderas contradicciones. Y entonces necesitas fijar un MRLE ayuda a entender estas paradojas. Pero la MRLE no resuelve paradojas-contradicciones, porque a mi entender éstas no existen. Y si aceptamos las paradojas-extrañezas de la RE tal como son, no necesitamos las MRLE.

Un detalle final: lo que tú llamas "fotografías mágicas" no son más que esquemas realizados desde el punto de vista de uno de los sistemas (el que tú arbitrariamente eliges como MRLE), teniendo en cuenta que los relojes se pueden sincronizar. Cualquier esquema realizado desde el punto de vista de otro sistema inercial sería igualmente una "fotografía mágica" porque habría resuelto igualmente el problema de la sincronización, pero ninguna es más "mágica" que otra en el sentido de que nos describa una situación más "real". Todos los esquemas describen la misma realidad objetiva, desde diversas perspectivas o puntos de vista. Es como si haces dos fotos en escorzo a un edificio, una desde la parte de delante, y otra desde la parte de detrás, y te planteas: las dos fotos son contradictorias, puesto que en una la parte de delante del edificio es mayor y en la otra lo es la parte de detrás; luego sólo una de ellas debe ser "mágica" pues refleja la realidad verdadera; pero resulta que no, que las dos fotos, igualmente válidas, son perspectivas diferentes de la misma realidad.

¿Tiene lógica la relatividad especial?

Ahora examinaremos la cuestión de si la relatividad es compatible con la lógica o no. En principio, la lógica no es más que un sistema formalizado que nos permite efectuar razonamientos y extraer conclusiones válidas a partir de unas premisas consideradas válidas (lo sean realmente o no), y que pone de manifiesto si un razonamiento es realmente válido o no, es

decir, si está extraído correctamente de las premisas o no. En principio, todos los seres humanos tenemos una lógica natural que nos permite hacer esto: razonar. Después vinieron los Aristóteles, Boole, Peano, Frege, Russell, Hilbert, Gödel... que escribieron sesudos libros y artículos para formalizar (y en algún caso, aclarar los límites de) nuestra capacidad de razonamiento; pero esto es otra cuestión. Nos atenderemos a la "lógica natural", examinaremos las premisas de la RE y veremos (hasta donde podamos) si nos llevan a contradicciones o no. Si nos llevan a contradicciones, serán incompatibles (si quieres, podemos decir "incompatibles con la lógica"). Si no llevan a contradicciones, serán compatibles con la lógica, sean verdaderas "realmente" o no.

Voy a referirme ahora a algunas cuestiones que tú planteas en tu página:

<http://www.geocities.com/newmodel2k/Logica.htm>

En primer lugar, quiero argumentar que la lógica, como sistema de razonamiento, es universal, y como tal la usa la ciencia. No hay, pues, una "lógica relativista", como no hay una "lógica clásica", ni una "lógica cuántica", etc. Tú dices que "la RE carece de lógica (porque), asumimos como principio lógico fundamental que existe una realidad subyacente. Esta realidad tiene propiedades independientes de los observadores. Por lo tanto llamamos verdadero a lo que coincide con esa realidad única y universal, y llamamos aparente a lo que se observa como hecho experimental contradictorio a dicha realidad subyacente". Estoy de acuerdo en que la RE carece de lógica, en el sentido señalado anteriormente, pero no en el que tú le quieres dar: que es contraria a la lógica (que tiene contradicciones). Estoy de acuerdo también con tu concepción realista (o materialista): la realidad es objetiva e independiente del observador (incidentalmente: algunos "filósofos" que elucubran sobre la mecánica cuántica no estarían de acuerdo). Pero, atención: esta realidad está formada por objetos materiales y por procesos que les ocurren a los objetos materiales, que tienen unas propiedades objetivas que se calculan teóricamente y se comprueban experimentalmente, en cada sistema de referencia, y también por acontecimientos que tienen lugar en un lugar del espacio y en un momento del tiempo, referidos a algún sistema de referencia que tomamos como origen. Ahora bien, entre las propiedades objetivas (intrínsecas) de los objetos no están las que necesitan una referencia, un objeto, un momento del tiempo, etc., alguna realidad extralingüística para cobrar sentido. Lo que no le puedes pedir a la RE es lo que no le pedimos a la física clásica (ni al sentido común vulgar): nadie se sorprende, de que no tengan sentido unívoco expresiones como: la batalla ocurrió antes (¿de qué?); Juan está aquí ("aquí" significa cosas distintas según quien habla); a la derecha (¿respecto a quién?), y más precisamente: el accidente ocurrió en el Km 50 (¿dónde tomamos el origen de kilómetros?), en el tiempo $t = 45$ seg (¿dónde tomamos el origen de tiempos?). Es decir, ocurrir en el Km 50 no es una propiedad objetiva del accidente, y no podemos preguntar si es una proposición verdadera o falsa; depende del sistema de referencia. No es que la realidad del accidente dependa del sistema de referencia. No; el accidente es un hecho objetivo, que ocurrió o no ocurrió. Ahora bien: "el accidente ocurrió en el Km 50" no es una proposición, no es verdadera ni falsa; es simplemente incompleta: falta el sistema de referencia (en lógica, se llama proposición a una frase a la que se le puede asignar un valor verdadero o falso; y no cualquier secuencia de palabras es una proposición; para que una frase sea una proposición no sólo tiene que ser gramaticalmente correcta, sino que además todos sus términos se han de referir a conceptos bien definidos en una teoría). Lo que sí es una proposición, a la que podemos asignar un valor verdadero o falso, es "el accidente ocurrió en el Km 50 de la carretera Madrid - Valencia, en dirección hacia Valencia"; ésta sí que será verdadera o falsa, y lo será para cualquier observador: será igual de verdadera o falsa para los supervivientes, que esperan quietos en el lugar del accidente, que para la ambulancia, que se acerca a toda velocidad (muy inferior a la de la luz, por ahora) hacia el lugar del accidente. Si es verdad en un observador, también lo es para el otro, y si es falsa, pues lo mismo para todos. Fíjate ahora en otro fenómeno claro para el sentido común, que no siempre recordamos: la relatividad de la copuntualidad: dos sucesos pueden ocurrir en el mismo punto o no, dependiendo del sistema de referencia. Imagina que yo estoy sentado en un autobús que va desde Madrid hacia Valencia a 100 Km/h. En el Km 15 abro mi libro para leer, pero al cabo de un rato, en el Km 50, me quedo dormido. Y ahora digo: "me quedé dormido en el mismo punto en que comencé a leer". ¿Verdadera o falsa? Pues depende del sistema de referencia: es verdadera si me refiero al mismo punto del autobús, pero es falsa si me refiero al mismo punto de la carretera. Simplemente, la frase anterior no es una proposición con sentido, no se le puede asignar un valor verdadero o falso. Ahora bien, si digo: "me quedé dormido en el mismo punto del autobús en que comencé a leer". Esto ya es una proposición, y es verdadera para los observadores de cualquier sistema de referencia: tanto en el sistema del autobús como en el de la carretera: tanto los pasajeros del autobús como los que lo ven pasar desde la cuneta estarán

de acuerdo. Y la alternativa: "me quedé dormido en el mismo punto de la carretera en que comencé a leer", es obviamente falsa para los observadores de los dos sistemas.

Vemos que propiedades como la posición, el momento del tiempo, la copuntualidad, etc. dependen del observador, tanto en la física clásica como en la RE. Pues bien, la RE sólo se diferencia de la física clásica (y del sentido común ordinario) en que añade a la lista algunas más: la simultaneidad, la medida de la longitud y de la duración, y otras que no tratamos (masa, campo eléctrico, campo magnético, etc.). Y la "lógica relativista" es la misma de antes: si "me quedé dormido en el mismo punto en que comencé a leer" no era una proposición con un valor verdadero o falso, tampoco lo es (para la RE) "me quedé dormido en el mismo instante en que comencé a leer" (¿en el mismo instante de qué sistema de referencia?). Si "el accidente ocurrió en el Km 50" no es una proposición, ni verdadera ni falsa, tampoco lo es (para la RE) "el coche mide 1 metro": necesitamos especificar el sistema de referencia; ni más ni menos que antes. Será una proposición "el coche mide 1 metro medido por los observadores fijos en la carretera"; podrá ser verdadera o falsa, pero su valor verdadero o falso será el mismo tanto para los de la carretera, como para los del coche, como para los de un avión que vuela, etc.

Ahora bien, entre estas propiedades objetivas de los objetos y procesos se encuentran tener una longitud propia (los objetos) y una duración propia (los procesos), en el sistema de referencia que les es propio, es decir, en el que están en reposo (al decir "longitud propia" o "duración propia" estamos especificando unívocamente el sistema de referencia en que medimos dicha longitud o duración). Si ahora colocamos ese mismo objeto (u otro idéntico) o repetimos el mismo proceso (ya no será exactamente el mismo, pues será en otro momento del tiempo, pero para el caso es igual: un proceso idéntico) en otro sistema inercial, tendrá ahora una longitud propia o una duración propia que será la misma que en el otro sistema (principio de relatividad). Tú defines un sistema cualquiera como MRLE, y estos objetos o procesos tendrán también una longitud impropia o una duración impropia en ese MRLE, sea el que sea. Y ahora, si lo deseas, llama "real" a la longitud (impropia) o a la duración (impropia) en ese MRLE. Y, lo dicho, cualquier sistema inercial te servirá como MRLE, porque todos son equivalentes.

Por ejemplo: "el coche tiene una longitud propia de 2 m", sí que es una proposición: significa "el coche mide dos metros si lo medimos en un sistema de referencia en que se encuentre en reposo (es decir, si lo medimos con un metro mientras está aparcado en el garaje)". Será verdadera o falsa, y lo será para todos los observadores. Supongamos que es verdadera; entonces, si el coche va por la carretera a $0,866c$ (nos gusta la velocidad, ¿eh?), la proposición "el coche tiene una longitud propia de 2 m" seguirá siendo verdadera para todos los observadores, aunque sólo puedan medirlo directamente los que viajan en su interior. Los que lo miran pasar desde la carretera, lo medirán (mediante observaciones simultáneas de sus extremos), obtendrán el resultado de 1 m y dirán: "en el sistema de la carretera, el coche mide 1 m", lo cual será verdadero, tanto para ellos como para los del coche. Entonces los de la carretera aplicarán la RE y deducirán que, si el coche se para, medirá 2 m (es decir, estarán de acuerdo con la frase "el coche tiene una longitud propia de 2 m"). Y los del coche, que recordemos, lo han medido y saben que mide 2 m (en el propio sistema ligado al coche), también pueden aplicar la RE y decir "aunque en nuestro sistema de referencia ligado al coche lo hemos medido y mide 2 m, como sabemos que el coche se mueve respecto a la carretera (o la carretera respecto al coche, que es lo mismo), sabemos que en el sistema de la carretera medirá 1 m"; que es lo que hemos visto antes. Es decir, y recapitulando: unos y otros (y quizá los de un avión, etc.) estarán de acuerdo en la verdad de las proposiciones: "en el sistema fijo al coche, el coche mide 2 m", "en el sistema de la carretera, el coche mide 1 m"; los del coche saben lo que ellos miden y pueden calcular lo que miden los de la carretera; y los de la carretera, lo mismo. Y todos están de acuerdo. En lo que nadie podrá ponerse de acuerdo es en frases como "el coche mide 2 m", "el coche mide 1 m"; todos preguntarán: ¿en qué sistema? No son proposiciones, y no tienen un valor de verdad ni de falsedad. Y no tiene sentido preguntarse "¿cuánto mide el coche realmente?" sin referencia a un sistema, a no ser que identifiquemos "realmente" con "longitud propia".

Un detalle más sobre todo esto. Una misma frase puede ser una proposición o no serlo según la teoría en que nos situemos. Por ejemplo, frases como "el coche mide 2 m" o "el concierto duró dos horas y media" son proposiciones en la física clásica y en el lenguaje cotidiano, y podrán ser verdaderas o falsas. Pero no son proposiciones en la RE, excepto si queda muy claro por el contexto en qué sistema medimos la longitud del coche o la duración del concierto, o bien si

queda claro que nos estamos refiriendo a la longitud propia del coche y a la duración propia del concierto.

Creo que ahora tendrías que aclarar en qué contradice la RE a la existencia de una realidad subyacente, y sobre el sentido de verdad o falsedad de tu proposición: "La verdad es relativa al observador". Por mi parte, creo que la verdad es objetiva (en eso coincidimos) y estoy argumentando que, según la RE, todos los observadores, aunque hagan mediciones diferentes, están siempre de acuerdo sobre la verdad objetiva. La RE da siempre respuestas objetivas (cualitativas y cuantitativas) a preguntas bien planteadas, y asigna valores de verdad o falsedad a las proposiciones. A parte de las indicadas en el párrafo anterior, podemos dar muchos ejemplos de preguntas a las cuales la RE dará una respuesta objetiva, en la cual todos los observadores estarán de acuerdo (algunas ya las hemos visto): ¿Llegarán puntuales a la cita los viajeros de los ejemplos vistos en los párrafos anteriores? ¿Cuál de los dos gemelos (verdaderos) será más viejo, el que ha hecho un viaje de ida y vuelta (o circular) a un lugar lejano, o el que ha permanecido en reposo relativo en la Tierra? Conocidas las velocidades de ida y de vuelta, ¿cuánto tiempo habrá pasado para cada uno de ellos? ¿Podrán ser detectadas en el detector de la superficie de la Tierra las partículas inestables originadas por los rayos cósmicos en la parte alta de la atmósfera, sí o no? Si la distancia entre la Tierra y la Galaxia de Andrómeda es de 2.000.000 de años-luz, ¿puede viajar a ella algún astronauta terrícola antes de morir de viejo, sí o no? Si este astronauta viaja a 0,9956 c respecto a la Tierra, ¿cuánto tiempo, medido en su nave (es decir, de su propia vida) tardará en llegar a Andrómeda? Si quiere llegar en 20 años de su propia vida, ¿a qué velocidad respecto a la Tierra necesita viajar? Conocida la masa en reposo de un electrón, ¿cuál será su masa (en el sistema laboratorio) si viaja en línea recta a 0,9987 c respecto al laboratorio? ¿Y su energía total? Conocidas las masas del protón y del núcleo de helio, y la energía de los neutrinos despedidos en el proceso, ¿cuanta energía se obtiene cuando se unen en el Sol cuatro protones para formar un átomo de helio? ¿Y cuando se parte un átomo de uranio (conocida su masa y la de los productos)? Teniendo en cuenta la masa del Sol, ¿la energía producida en el mismo es suficiente para calentar la Tierra, o no? Etc., etc. La RE resuelve todos estos problemas y muchos otros, y nunca dará respuestas ambiguas ni contradictorias, o que dependan del observador, a preguntas de este tipo, ni respuestas que entren en contradicción con las observaciones (al menos, hasta ahora). ¿Continúas manteniendo de verdad que "la RE no ataca el fondo de la cuestión (¿hubo o no hubo intento de asesinato?), y discute sólo la apariencia de los hechos"?

La increíble historia de la Varilla Mágica

Veamos el ejemplo que das sobre la varilla Sol - Alfa Centauro: en el sistema A, fijo a las dos estrellas, construyen una varilla A que va de una estrella a la otra y que mide 4 años-luz; en una nave B, que viaja a 0,866 c respecto a A, construyen otra varilla B que mide 2 años-luz, y consiguen colocar sus extremos sobre ambas estrellas simultáneamente (para ellos). Muy bien. Pero en otra nave C, que viaja a 0,866 c respecto de B, tienen otra varilla que mide un año-luz y con la cual pretenden unir también las dos estrellas; de momento, lo que consiguen es poner sus dos extremos simultáneamente (para ellos) sobre los de la varilla B (ya veremos si consiguen o no su objetivo inicial: colocar su varilla C de 1 año-luz con sus extremos sobre ambas estrellas simultáneamente para ellos; a esto debe dar respuesta la RE, pero en tu exposición no me queda muy claro). Hasta aquí, todo parece perfecto. Pero el sistema A también viaja respecto al B a 0,866 c respecto a B (ojo, en valores absolutos, sin tener en cuenta la dirección de movimiento), luego en A deben tener también una varilla de 1 año-luz (como la de C) cuyos extremos han de ser capaces de superponer simultáneamente (para ellos) sobre los de la varilla B. La conclusión que podríamos extraer es que en el sistema A (solidario con el Sol y con Alfa Centauro) hay una varilla de 4 años-luz y otra varilla de 1 año-luz que tienen ambas sus extremos uno en el Sol y otro en Alfa Centauro. Es decir, que la distancia en el sistema A del Sol a Alfa Centauro es de 4 años-luz y de 1 años-luz. Esto sí que es una auténtica contradicción, y si de verdad esto se dedujera de la RE, habría que abandonarla inmediatamente; es más, habría sido abandonada hace muchos años.

Antes de sumergirnos en profundidades, hay que señalar que todavía no has demostrado (ni siquiera tú lo afirmas explícitamente) que los de C hayan conseguido su verdadero objetivo, que era unir las dos estrellas con su varilla C de 1 año-luz (luego veremos si lo consiguen o no). Tú te limitas a afirmar (premisa 3 en su primera formulación), que "en el sistema C hay una varilla de 1 año luz que corresponde exactamente a la longitud de la varilla B", o bien (premisa 3 en su

segunda formulación) que "en el sistema A hay una varilla de 1 año luz que corresponde exactamente a la longitud de la varilla B" (ahora analizaremos estas frases, y veremos si son proposiciones o no). Por tanto, no podemos extraer, como conclusión, que "en el sistema A hay una varilla A' de 1 año luz que corresponde exactamente a la distancia Sol - Alfa Centauro". Creo que esto te quedó claro a partir del comentario de César Tejada, pero tú insistes en afirmar: "si ambas premisas son verdaderas (en forma absoluta), la conclusión es ineludible". Sin embargo, tú no enuncias explícitamente la contradicción. A lo más que podríamos llegar es a una afirmación de estilo:

Conclusión 1: En el sistema A hay dos varillas, la varilla A de 4 años-luz, y la varilla A' de 1 año-luz, que corresponden exactamente a la longitud de la varilla B.

En seguida veremos si esta conclusión es válida, y si es una contradicción o no.

Antes analicemos tu forma de salir de la "paradoja"; para ello, afirmas que la premisa 2, que, recordemos, dice "en el sistema B hay una varilla de 2 años luz que corresponde exactamente a la distancia Sol - Alfa Centauro", repito, dices que "naturalmente la solución (para evitar la paradoja) es que la premisa 2 es verdadera en B pero no es verdadera en A", y que "la veracidad de cada premisa depende del sistema de referencia". Ya he argumentado suficientemente antes sobre la "relatividad de la verdad". Analicemos la premisa 2 en sí misma: ¿qué quiere decir "corresponde exactamente"? iiEsto no está definido, no son conceptos de la RE!! Además, "corresponde exactamente a la distancia Sol - Alfa Centauro", ¿en que sistema? Tengo derecho a preguntarlo, pues sabemos que la medida de la longitud de un objeto depende del observador, y eso no es una contradicción, y ya he argumentado que no atenta contra la lógica. Como tú no especificas en qué sistema, afirmas que la premisa 2 es verdadera para B, pero no para A; pero no es que sea verdadera para unos sí y para otros no; es que hay que especificar el sistema de referencia en que se hacen las medidas. Con conceptos no definidos y frases incompletas no podemos formar oraciones con sentido preciso, a las que se pueda asignar un valor de verdad o falsedad. Creo que tu premisa B no es una proposición.

La frase "corresponde exactamente", sobre la cual tendremos mucho más que decir más adelante, también figura en tu premisa 1; no obstante, aquí es menos ambigua, y puede reformularse fácilmente así:

Premisa 1': Existe una varilla A en reposo respecto al sistema A, de 4 años-luz en A, cuya longitud es igual a la distancia Sol - Alfa Centauro también medida en A.

Esto no es ambiguo, uso sólo conceptos definidos y tengo una proposición a la cual puedo asignar un valor de verdad o falsedad. Creo que todos (tú, yo, César, los de A, los de B, los de C...) estaremos de acuerdo en que la premisa 1', así formulada, es verdadera. Está claro también que la longitud medida en A de la varilla A y de la distancia Sol - Alfa Centauro son longitudes propias, pues tanto la varilla como las estrellas están en reposo en el sistema A, solidario con ambas estrellas. Intentaré ahora reformular tu premisa 2, y obtendré la

Premisa 2': Existe una varilla B en reposo respecto al sistema B, de 2 años-luz en B, cuya longitud es igual a la distancia Sol - Alfa Centauro también medida en B.

Formulada así, exclusivamente con conceptos definidos en la RE, podemos intentar juzgar si es verdadera o falsa, y si lo es dependiendo del sistema de referencia o no. Hemos visto que la longitud dada de 4 años-luz de la varilla A (o la distancia Sol - Alfa Centauro) medida en A es una longitud propia. Como el sistema B se mueve respecto a A a $0,866 c$, la longitud que midan los de B de la distancia Sol - Alfa Centauro será una longitud impropia. Realizados los cálculos según la RE, obtienen que la distancia Sol - Alfa Centauro en B es de dos años luz. ¿Cómo lograrán los de B comprobar si es correcto este cálculo? Pues, como tú muy bien explicas, colocando simultáneamente (según ellos) los dos extremos de su varilla B, que saben que mide en su sistema 2 años-luz, sobre las dos estrellas, y viendo (observaciones simultáneas a distancia) que coinciden. Por tanto, los de B tienen claro que la premisa 2' es correcta. Pero, ¿qué opinan los de A? ¿Están de acuerdo o no? Los de A no tienen nada que objetar sobre la longitud de la varilla B medida en B; saben que los de B la han construido y que la mantienen en reposo en su nave, luego aceptan de buen grado que su longitud medida en B es de 2 años-luz, y aceptan además que esta es la longitud propia de la varilla. Los de A también estarán de acuerdo en el cálculo

sobre la distancia Sol - Alfa Centauro medida en B; los científicos de A conocen tan bien la RE como los de B (¡faltaría más!; ellos son terrícolas y la RE se descubrió en la Tierra) y saben que como dicha distancia es, medida en A (longitud propia), de 4 años-luz y B se mueve respecto a A a $0,866 c$, pues aceptan el cálculo realizado por los de B: esta distancia es de 2 años-luz medida en B. Luego la varilla de dos años-luz en B es igual de larga que la distancia Sol - Alfa Centauro en B: 2 años-luz. Me enredado un poco, para intentar dejar claro que también los de A aceptan como verdadera la premisa 2'. Creo que tú, César, yo, y hasta los científicos de C, estarán de acuerdo en lo mismo: la premisa 2' es verdadera, para todos los observadores y se mire por donde se mire. Podemos formularla también de la siguiente forma, que será igualmente aceptada como verdadera por todos:

Premisa 2'': En el sistema B hay, en reposo respecto a B, una varilla B, de longitud 2 años-luz medida en B, cuyos extremos pueden hacerse coincidir de manera simultánea (para los observadores de B) sobre las estrellas Sol y Alfa Centauro, o lo que es lo mismo, sobre los extremos de la varilla A de 4 años-luz medidos en A.

Respecto a la premisa 3, en la página que comentamos das varias formulaciones distintas de ella. Teniendo en cuenta sólo las dos que se refieren a la varilla A', en la segunda de ellas (la que figura en la respuesta a César), usas la dichosa frase "corresponde exactamente", que analizaremos después. Y en la primera no especificas en qué sistema se miden las longitudes; si suplimos la falta suponiendo que te refieres a las longitudes propias, entonces es directamente falsa: la longitud propia de la varilla A' es de un año-luz, y la longitud propia de la varilla B es de dos años-luz; luego no son idénticas; una es el doble que la otra. Reformulemos pues, la premisa 3, de la siguiente forma:

Premisa 3': Existe una varilla A' en reposo respecto al sistema A, de 1 año-luz en A, cuya longitud es igual a longitud de la varilla B también medida en A.

Un razonamiento en todo paralelo al anterior nos convencerá de que esta proposición es verdadera, y que lo es para todos los observadores. A la longitud de la varilla B medida en B, de 2 años-luz (longitud propia), le corresponde una longitud impropia de 1 año-luz, que es la longitud que obtendrán los de A cuando midan la varilla B mediante observaciones simultáneas en A, y que coincide con la longitud de la varilla A' también medida en A. Podemos, pues, formular la premisa 3' de manera equivalente, que también será aceptada como verdadera por todos, así:

Premisa 3'': En el sistema A hay, en reposo respecto a A, una varilla A', de longitud 1 año-luz medida en A, cuyos extremos pueden hacerse coincidir de manera simultánea (para los observadores de A) sobre los extremos de la varilla B de 2 años-luz medidos en B.

Si ahora unimos las premisas 2'' y 3'', obtendremos la

Conclusión 1': En el sistema A hay, en reposo respecto a A, dos varillas: la varilla A, que mide 4 años-luz en A, y la varilla A', de un año-luz de longitud también medida en A. En el sistema B hay una varilla B, de longitud 2 años-luz medida en B, cuyos extremos pueden hacerse coincidir, de manera simultánea para los observadores de B con los extremos de la varilla A. Y a su vez, los extremos de la varilla A' puede hacerse coincidir, de manera simultánea para los observadores de A, sobre los extremos de la varilla B.

¿Es esto una contradicción, o no? ¿Es verdadera o falsa? ¿Es igual de verdadera o falsa para todos los observadores? Por mi parte, yo no veo ninguna contradicción, y espero que tú estés de acuerdo, y, si no, espero convencerte. El hecho de que puedan hacerse coincidir los extremos de la varilla B con los de A y los de A' sería gravísimo, inadmisibles, contradictorio, si la coincidencia entre las tres varillas fuera simultánea (en un único experimento). Equivaldría a decir que $1 = 4$. Pero la coincidencia no es simultánea, sino sucesiva: en un experimento, los de B despliegan su varilla sobre la varilla A y hacen coincidir los extremos de ambas varillas de manera simultánea para el sistema B. Pero, como dice César (y la RE), lo que es simultáneo para los de B no es simultáneo para los de A; por tanto, esta coincidencia simultánea de los extremos de la varilla B y de la varilla A la observarán los científicos de B, pero no los de A. En otro experimento distinto, son los de A los que despliegan su varilla pequeña A' y observan que sus extremos coinciden simultáneamente (para A) con los de la varilla B; coincidencia que observarán en A, pero no en B.

En el primer experimento, lo que hacen realmente los de B es medir, mediante observaciones simultáneas a distancia, la varilla A fija en A. Y en el segundo experimento, son los de A los que, por el mismo método de observaciones simultáneas a distancia, miden la longitud de la varilla B fija en B. Son experimentos distintos y no hay ninguna contradicción, pues recuerda que lo que buscamos son afirmaciones contradictorias para un único experimento. Respecto a la verdad de la conclusión 1' diremos que, puesto que es la simple unión de conclusiones verdaderas aceptadas por todos los observadores, es también verdadera y será aceptada como tal por todos los observadores.

Si comparamos la conclusión 1' con la conclusión 1 de más arriba, que tú no llegas a formular pero que yo he sacado como conclusión a partir de tus premisas, observamos la ambigüedad de la frase "corresponde exactamente". En tus premisas, y en la conclusión 1, X corresponde exactamente con Y puede significar dos cosas completamente distintas:

Corresponde exactamente 1: los extremos de X se pueden hacer coincidir con los de Y mediante observaciones simultáneas en el sistema propio de X (en el cual X está en reposo).

Corresponde exactamente 2: los extremos de X se pueden hacer coincidir con los de Y mediante observaciones simultáneas en el sistema propio de Y (en el cual Y está en reposo).

Como el sistema propio de X es distinto del sistema propio de Y, y los acontecimientos simultáneos en el sistema propio de X no lo son en el de Y, y viceversa, la frase es ambigua, y tus premisas junto con la conclusión 1 no son proposiciones. No son verdaderas ni falsas.

Antes de seguir adelante, hay que aclarar que hay dos sistemas de referencia distintos que cumplen el requisito de moverse respecto a B a una velocidad, en módulo, de $0,886 c$. Uno de ellos es el sistema A, tal como hemos visto. Si definimos el sentido positivo de eje Sol - Alfa Centauro como el sentido que se dirige hacia Alfa Centauro, en realidad A se mueve respecto a B a $-0,866 c$ (es decir, con velocidad negativa, puesto que B se mueve respecto a A a $0,866 c$, con velocidad positiva). Esto no tiene importancia en nuestra discusión anterior, puesto que en las fórmulas de transformación de longitudes propias en impropias figura la velocidad relativa elevada al cuadrado, luego no importa el signo (el sentido del movimiento). Pero en la discusión que sigue usaré las fórmulas de transformación de velocidades, donde sí que importa el signo de v . Definiremos, pues, el sistema C como aquél que se mueve respecto a B a una velocidad de $+0,866 c$, es decir, en el sentido "hacia Alfa Centauro".

Creo que está claro que los de A no pueden desplegar su varilla corta A' , de 1 año-luz de longitud propia, poniendo sus extremos en el Sol y Alfa Centauro respectivamente de manera simultánea (para A): les queda demasiado corta. Pero queda pendiente la respuesta a la cuestión más complicada de las planteadas hasta ahora: ¿consiguieron realmente los de C situar los extremos de su varilla C de 1 año-luz de longitud propia simultáneamente (para ellos) sobre las estrellas Sol y Alfa Centauro, o no? Obsérvese que esto es equivalente a preguntar: la longitud medida en C de la varilla A (o de la distancia Sol - Alfa Centauro, que es lo mismo), ¿es realmente de 1 año-luz, o no? La medida de la varilla A en el sistema C implica una observación simultánea (en C) de los extremos de la varilla A, y una comparación con alguna varilla fija en C cuya longitud propia conozcan los de C. Las preguntas están bien formuladas, contienen conceptos claros bien definidos en la RE, y la RE tiene que dar una respuesta clara. En caso contrario, la RE no serviría para nada. Probablemente ya tienes clara la solución, que es la que expone César. Trataré de explicar la cuestión más detalladamente, y permitidme inventar un pequeño relato para hacer la exposición un poco más amena.

Digamos que el proyecto de C originó grandes debates entre los ingenieros y físicos, debates que trascendieron a la opinión pública y a los medios de comunicación. Así, mientras el proyecto oficial Varilla Mágica, apoyado por el gobierno, construyó con grandes medios y publicidad su varilla C de 1 año-luz, el Colegio de Físicos Teóricos de C (COFITEC), crítico con el proyecto oficial, construyó, con materiales más baratos y reciclables, una varilla C' más corta, de $0,57$ años-luz solamente, que según ellos bastaría para unir ambas estrellas.

¿Cuál era el razonamiento de cada uno de los proyectistas? Los del proyecto oficial razonaban así: puesto que la distancia Sol - Alfa Centauro (y la longitud de la varilla A) medida en A es de 4 años-luz (longitud propia), esta distancia, medida por los de B, será de 2 años-luz: los de B

tendrán éxito con su varilla B de dos-años luz. Pero nosotros nos movemos respecto a B, luego la varilla de B, si la medimos nosotros, medirá sólo 1 año-luz. Por tanto, si nosotros medimos la varilla A (o la distancia Sol - Alfa Centauro), debemos obtener un resultado de 1 año-luz. Construyamos por tanto una varilla de 1 año-luz y podremos poner ambos extremos simultáneamente (para nosotros) sobre los extremos de la varilla B y sobre las dos estrellas (y por tanto sobre los extremos de la varilla A).

Los que apoyaban el proyecto COFITEC se limitaron a aplicar estrictamente las fórmulas de la RE, poniendo especial cuidado en plantear claramente el problema y en dar a cada símbolo de las fórmulas su significado correcto. Ellos se plantearon, en primer lugar: B se mueve respecto a A a $0,866 c$; C se mueve respecto de B a $0,866 c$; ¿cuál será la velocidad de C respecto de A? Aplicando un poco la intuición física (paso que siempre ha de ser previo a la solución numérica, pero que no debe obviar ésta) se comprende que la velocidad de C respecto a A ha de ser superior a la de B respecto a A (puesto que B y C se mueven ambos en la misma dirección respecto a A, pero C se mueve más rápido; sin embargo la velocidad buscada no puede ser el doble que la de B respecto a A, como indicaría la suma de velocidades de Galileo (que sabemos que no es válida para velocidades grandes), pues este doble sería superior a c , lo cual es contrario a la RE. Apliquemos pues, dicen, la verdadera fórmula de transformación de velocidades (por ejemplo, de Física, M. Alonso - E. Finn, p. 411, ec. 19.10; atención, en la fórmula correspondiente de la primera edición de este texto en tres volúmenes, que por lo demás a mí me gusta más, había un error de un signo): $V = (V' + v) / (1 + vV'/c^2)$, donde V es la velocidad de C respecto a A buscada, V' es la velocidad de C respecto a B, v es la velocidad de B respecto a A y c es como siempre la velocidad de la luz. Usamos esta fórmula, que en realidad es la de la transformación inversa, puesto que nos dará directamente la velocidad buscada; esta fórmula se deduce directamente despejando V de la fórmula de transformación directa que aparece también en los textos: $V' = (V - v) / (1 - vV/c^2)$ (obra citada, ec. 19.9). Veamos: $V = (0,866 + 0,866) c / 1 + 0,866 \cdot 0,866 c^2/c^2 = 0,9897 c$. Vamos bien, piensan los del COFITEC: una solución con una velocidad de C respecto a A mayor que la de B respecto a A pero menor que la velocidad de la luz. Ahora apliquemos la fórmula para hallar la distancia Sol - Alfa Centauro en el sistema C, es decir, para hallar la longitud impropia en C que corresponde a una longitud propia de 4 años-luz (obra citada, ec. 19,15, p. 413): $L = (1 - v^2/c^2)^{1/2} L'$, donde L es la longitud impropia, L' es la longitud propia, v es la velocidad relativa entre los dos sistemas, la que hemos hallado antes y c la velocidad de la luz. Obtienen: $L = [1 - (0,9897 c)^2 / c^2]^{1/2} \cdot 4 \text{ años-luz} = 0,57 \text{ años-luz}$. iiEn lugar de 1 año-luz, como mantienen los del proyecto oficial Varilla Mágica!!

Llegado el día del gran experimento, todos los medios de comunicación conectaron en directo para ver los resultados y dilucidar quién tenía razón. Llegada la hora, quedó claro que, mientras un extremo la varilla C, la Varilla Mágica del proyecto oficial, de 1 año-luz de longitud, pomposamente iluminada y adornada con banderitas, se situaba sobre el Sol, el otro extremo sobrepasaba con creces a la estrella Alfa Centauro. En cambio, la varilla C' del COFITEC, de 0,57 años-luz, más modestamente decorada, conseguía colocarse con ambos extremos simultáneamente (en C) sobre ambas estrellas (esta claro que en un experimento real esto se verificaría enviando, desde el punto central, sendos rayos hacia los extremos y observando si el tiempo que tardan en rebotar y regresar es el mismo). Los del proyecto oficial obtuvieron sin embargo un éxito parcial, pues se observó que los extremos de su varilla C coincidían con los de la varilla B, circunstancia que el gobierno trató de rentabilizar publicitariamente al máximo.

Sin embargo, en definitiva el gobierno no pudo disimular el fracaso real del proyecto oficial, y el éxito del proyecto alternativo del COFITEC. Los políticos de la oposición criticaron duramente el despilfarro de dinero público que había supuesto la Varilla Mágica, y algún ministro se vio obligado a dimitir. Los debates y la confusión subieron de tono cuando llegaron las noticias del sistema B: ellos afirmaban haber obtenido éxito y haber podido superponer ambos extremos de su varilla B (de 2 años-luz en B) sobre ambas estrellas. ¿Cómo podía ser posible esto?

Tras algún tiempo de agitación, el gobierno y el COFITEC decidieron formar una comisión conjunta de investigación, que después de acalorados debates lograron al fin ponerse de acuerdo y emitir un informe aprobado por unanimidad, que más o menos decía lo siguiente: la varilla A de 4 años-luz del sistema A (distancia Sol - Alfa Centauro) en reposo en A (longitud propia) debe ser medida por los observadores de B con el resultado de 2 años-luz (longitud impropia). Pero los físicos de B realizaron esta medida mediante observaciones simultáneas a distancia de la coincidencia de los extremos de la varilla A con su propia varilla B fija en B, de 2 años-luz. Esto

explica el éxito comunicado por los científicos de B acerca de su experimento: ellos lograron poner los extremos de su varilla sobre ambas estrellas simultáneamente (según ellos). Llamemos P al acontecimiento "paso del extremo 1 de la varilla B por el Sol" y Q al acontecimiento "paso del extremo 2 de la varilla B por el Alfa Centauro". Debido a la simultaneidad de la distancia, P y Q son simultáneos en el sistema B, pero no son simultáneos en C. Igualmente, la varilla B de 2 años-luz en reposo en B (longitud propia) debe ser medida por los observadores de C con el resultado de 1 año-luz (longitud impropia). Los científicos de C pueden realizar esta medida mediante observaciones simultáneas a distancia de la coincidencia de los extremos de la varilla B con una varilla propia de 1 año-luz. Esto explica el éxito parcial del proyecto oficial de C "Varilla Mágica"; aunque fracasaron en su intento principal, sí que consiguieron superponer simultáneamente (para los de C) su Varilla Mágica C sobre los extremos de la varilla B. Llamemos R al acontecimiento "paso del extremo 1 de la varilla C por el extremo 1 de la varilla B", y S al acontecimiento "paso del extremo 2 de la varilla C por el extremo 2 de la varilla B". Pero, ¿porqué, a pesar del éxito de los de B, el proyecto oficial de C fracasó? Suponiendo que las líneas de movimiento de los tres sistemas sean paralelas y muy próximas, los de C siempre pueden hacer coincidir, si lo desean, el acontecimiento P con el acontecimiento R, en el mismo lugar y (Sol) al mismo tiempo ($t = 0$ seg) de A; es decir, los acontecimientos P y R son un único acontecimiento que llamaremos PR "paso por el extremo izquierdo de la varilla A (Sol) de los extremos izquierdos de las varillas B y C" (los acontecimientos que ocurren en un mismo lugar de un sistema de referencia y al mismo tiempo en ese sistema, son copuntuales y simultáneos no sólo en ese sistema sino en todos, puesto que la relatividad de la simultaneidad sólo afecta a los acontecimientos a distancia, es decir, separados espacialmente en el sistema en que son simultáneos, luego PR ocurre en el mismo lugar y al mismo tiempo no sólo de A, sino también de B y de C). Sin embargo, si PR es simultáneo a Q en el sistema B, ya hemos dicho que no puede serlo en C. Y si PR es simultáneo a S en C, el acontecimiento Q no puede ser simultáneo al acontecimiento S en C, es decir, Q y S son dos acontecimientos diferentes; aunque ocurren en el mismo lugar de B (extremo 2 de la varilla B), ocurren en momentos distintos de C (y si hacemos un razonamiento similar, también de B). Por tanto, el paso del extremo 2 de la varilla B por Alfa-Centauro (acontecimiento Q) sucede en un momento distinto del tiempo de C que la coincidencia de los extremos 2 de las varillas B y C (acontecimiento S). Luego el extremo 2 de la varilla C no puede pasar por Alfa Centauro al mismo tiempo (de C) que el extremo 1 de la varilla C pasa por el Sol. Puesto que la varilla C, de 1 año-luz de longitud en C, no se puede superponer por sus extremos simultáneamente (para los de C) sobre las estrellas Sol y Alfa Centauro, esto significa que la medida de esta distancia en el sistema C no es de 1 año-luz. Los cálculos oficiales estaban equivocados; no tuvieron en cuenta la relatividad de la simultaneidad a distancia.

No tendremos ninguna dificultad ahora para comprender el éxito del proyecto alternativo del COFITEC. Ellos aplicaron las fórmulas de la RE para la transformación de las velocidades (de Einstein), hallaron la velocidad correcta de C respecto a A, y en base a este valor, hallaron la longitud impropia correspondiente a esa velocidad para la distancia Sol - Alfa Centauro (o para la varilla A, cuya longitud propia es de 4 años-luz) que ellos deberían medir en su sistema C. Hallaron 0,57 años-luz, y por eso construyeron una varilla C' de esa longitud, cuyos extremos, por supuesto, lograron colocar simultáneamente (según C) en ambas estrellas. Por supuesto que su varilla C' no se pudo superponer con la varilla B (de longitud propia 2 años-luz) pero los del COFITEC (ni tampoco los del gobierno) no pretendían eso (un razonamiento parecido al del párrafo anterior nos convencerá, si no lo estamos ya); los del COFITEC ya sabían que una longitud propia de 2 años-luz de una varilla de B correspondía a una medida de 1 año-luz en C (y no de 0,57 años-luz). En el COFITEC tenían claro que las tres varitas no se pueden superponer simultáneamente en los tres sistemas, porque conocían la relatividad de la simultaneidad a distancia.

Digamos como final de la historia que los físicos e ingenieros de A y de B, que habían seguido de lejos los debates producidos en C, cuando tuvieron noticia de este informe no tuvieron ninguna dificultad en admitirlo también como válido.

Una cuestión de principios

Veamos ahora qué fundamento tienen los principios de la RE, si son compatibles con la lógica y hasta qué punto son dignos de crédito. La RE, como es bien sabido y tú indicas en tu sitio, parte de dos principios que son aceptados como tales. Ya decimos, son aceptados como principios, y a partir de ellos se desarrollan matemáticamente las consecuencias: toda la RE.

Como son principios, para su examen lógico no hace falta que sean verdaderos o no; serán compatibles con la lógica si no llevan a contradicciones. Claro, si los principios fueran falsos (aunque fueran compatibles con la lógica), llevarían a una teoría falsa, y cuando examináramos las consecuencias observables de dicha teoría y las comparáramos con los hechos realmente observados, nos daríamos cuenta de que la teoría es falsa, y por tanto alguno de los principios también lo es (suponiendo, claro, que no hemos cometido ningún error "lógico" en la deducción de la teoría o de sus consecuencias). A este respecto, tú estarás de acuerdo en que las consecuencias observables de la RE han sido corroboradas por la observación desde hace casi un siglo, sin que hasta ahora se haya observado la más mínima desviación entre RE y observación.

Pero veamos ahora los principios de la RE. Para aceptarlos como "compatibles con la lógica", no hace falta que sean realmente verdaderos, como ya he dicho. No obstante, argumentaré un poco sobre porqué yo los veo plenamente aceptables como verdaderos. Hay que aclarar que, como los dos incorporan una velocidad constante de la luz, el nombre, e incluso la exposición, que se le da a cada uno de los principios es confuso en algunos textos. Para evitar confusiones, yo enunciaré entre comillas la frase que da Einstein para cada principio, y les daré un nombre que mantendré a lo largo de toda la exposición.

Principio de relatividad (PR): "Las mismas leyes de la electrodinámica y la óptica son válidas en todos los sistemas de referencia en los cuales las leyes de la mecánica funcionan bien". Los sistemas en que las leyes de la mecánica funcionan bien son los sistemas inerciales, y el hecho de que en ellos funcionen igualmente bien, según Einstein, las leyes del electromagnetismo (de Maxwell) implica que en estos sistemas inerciales la velocidad que se mide de la luz es la misma para todos ellos: una velocidad constante igual a c (puesto que el valor de c se deduce de las propias leyes de Maxwell. Esto quiere decir, como es bien sabido, que las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales, y como conclusión, que no se puede distinguir, mediante experimentos físicos realizados en un sistema inercial, ninguno de ellos como especial, que todos ellos son equivalentes y que el movimiento (la velocidad) siempre es relativo: no hay posiciones ni velocidades absolutas, sino siempre referidas a un sistema. Antes de Einstein, todo esto era plenamente aceptado para las leyes de la mecánica (relatividad restringida de Galileo), pero no para las leyes del electromagnetismo, ya que se suponía que la velocidad deducida para la luz c se tenía que medir respecto al "éter" en reposo absoluto. A partir del fracaso del experimento de Michelson-Morley quedó claro que no se podían medir velocidades absolutas respecto al éter, y quedaba cuestionado el mismo éter como sistema absoluto. Lo que hace Einstein es aceptar plenamente el resultado de Michelson-Morley y extender el principio de relatividad no sólo a las leyes de la mecánica sino a todas las leyes de la física, incluidas las del electromagnetismo, y la de que la velocidad de la luz es c , que es una consecuencia. Para los que nos hemos acostumbrado desde hace años a pensar en términos de equivalencia de todos los sistemas, no presenta dificultades: el PR es evidente para las leyes de la mecánica (todos hemos viajado en tren y hemos comprobado que, mientras el tren no acelere o suba o baje una cuesta, y si no traquetea demasiado, podemos pasear o correr por los pasillos sin hacer más esfuerzo en una dirección que en otra; yo no he viajado en trasatlántico nunca, pero acepto plenamente que se pueda jugar un partido de tenis en cubierta mientras las olas no bamboleen el barco, etc. etc.; son hechos bien conocidos y aceptados); y si el PR es aceptable para la mecánica, no veo ninguna razón por la cual no haya de ser válido para las restantes leyes de la física. El hecho de que lo sea le da una unidad y coherencia al conjunto de la física que, al menos a mi, me resulta confortable.

Principio de independencia de la velocidad de la fuente (PI): "la luz siempre se propaga en el espacio vacío a una velocidad constante " c " que es independiente de la velocidad del objeto emisor". Es decir, la velocidad de la luz es c , tanto si el emisor está en reposo respecto a nosotros como si está en movimiento. En algunos textos se llama a éste "principio de constancia de la velocidad de la luz", puesto que velocidad de la luz es constante, independientemente del movimiento de la fuente. En otros, se le llama "principio de unicidad de los rayos lumínicos", ya que implica que si dos cuerpos, uno de ellos en reposo respecto a nosotros y otro en movimiento, emiten sendos rayos de luz, ambos rayos se desplazan a la misma velocidad, es decir, como si fuera un único rayo. Como vemos, son diversas formas de formular lo mismo. Este principio era plenamente aceptado antes que Einstein, puesto que está incorporado en las leyes del electromagnetismo del siglo XIX, que son consideradas válidas hasta ahora. Lo que hizo Einstein fue, precisamente, modificar las leyes de la mecánica para hacerlas compatibles con las del electromagnetismo. Por tanto, hemos de aceptar el PI, salvo que queramos enmendarle la plana

a Maxwell, Faraday, Ampère, Hertz, Lorentz... La unicidad de los rayos lumínicos independientemente del movimiento de la fuente fue confirmada experimentalmente por De Sitter en sus observaciones del movimiento de las estrellas dobles. Por mi parte, no tengo ningún inconveniente en aceptar el PI: supongamos que yo estoy parado en la carretera y veo que se cruzan dos coches en la delante de mí, uno que está también parado a digamos 200 metros delante de mí, y el otro que viene de frente, y supongamos que al cruzarse sacan el brazo por la ventanilla para saludarse; me parece natural ver la imagen de los dos coches (de las dos manos) al mismo tiempo, y me parecería extrañísimo ver primero el que viene de frente y después el que está parado, o al revés.

Hemos visto que, tomados por separado, ambos principios son plenamente aceptables (al menos para mí). Pero lo que es más importante y objetivo, son plenamente conformes con la experiencia (experimentos de Michelson-Morley y de De Sitter), y son coherentes con el resto de la física. Es decir, no son dos principios cualquiera que aceptamos porque sí; son, digamos, una buena base de donde partir.

Por lo que tú expones, no me queda claro si tú aceptas o no alguno de los dos principios, los dos (creo que no) o ninguno. En algún lugar dices que "yo no logré compatibilizar la constancia *verdadera* de la velocidad de luz para todos los sistemas inerciales con la lógica", con lo cual parece que cuestionas el PR. En otro lugar dices que "en realidad lo que hace falta es un medio que actúe de soporte para transmitir las ondas electromagnéticas. Afirmar simultáneamente que la velocidad de la luz no depende de la velocidad de la fuente y que no necesita un medio soporte para propagarse, lleva inevitablemente a paradojas. Quienes crean entender el planteo relativista sobre la forma en que se propagan las ondas electromagnéticas sin un medio soporte y con independencia de la velocidad de la fuente, están invitados a acercarme unas líneas para incluirlas en esta página de discusiones." Y aquí parece que lo que rechazas es el PI. Creo que, para una mayor coherencia de tu exposición, deberías aclarar esta cuestión.

Veamos ahora si, tomados juntos, los dos principios de la RE son compatibles con la lógica o no, es decir, si llevan o no a contradicciones. El mismo Einstein dice que el segundo principio es "sólo aparentemente irreconciliable con el primero". Es decir, reconoce que hay una paradoja, pero una paradoja aparente, no una paradoja-contradicción (en el sentido que expuse en el apartado 1). Es muy fácil llegar a paradojas aparentes si unimos los dos principios. Veamos un ejemplo: supongamos estamos parados en una vía y que desde el vagón de un tren en movimiento que se aleja de nosotros a una velocidad constante v un primer actor, parado en la vía, lanza un rayo de luz $R1$ en la dirección del movimiento del tren y en el sentido de avance del tren, es decir, alejándose también de nosotros, y un segundo actor, subido en el tren y en movimiento solidario con este, lanza, también hacia delante, un segundo rayo de luz $R2$. Si aceptamos el PR, el rayo $R1$, lanzado por el actor de la vía, se moverá a velocidad c respecto a nosotros, y igualmente el rayo $R2$, lanzado por el actor del tren, viajará una velocidad c respecto al tren; pero entonces, si aplicamos la fórmula clásica de suma de velocidades conocida como "transformación de Galileo", la velocidad de $R2$ respecto al nosotros será de $c+v$, y aquí entramos en contradicción con PI (puesto que el rayo $R1$, lanzado por el actor en reposo, viajaba a velocidad c , mientras que el $R2$, lanzado por el actor en movimiento, viaja, según hemos visto, a $c+v$). Supongamos ahora que deseamos mantener como cierto PI; entonces, para nosotros, tanto $R1$ (fuente en reposo) como $R2$ (fuente móvil) viajan a la misma velocidad c ; pero entonces, para los observadores del tren el rayo $R2$ viajará a una velocidad $c-v$, en contra de PR.

¿Son realmente incompatibles ambos principios, tomados en conjunto, con la lógica? ¿Dan lugar realmente a contradicciones? Lo que ocurre es que, a veces, en un razonamiento, llegamos a contradicciones aparentes porque no usamos sólo las premisas explícitas, sino que introducimos como "de contrabando" suposiciones implícitas que se basan en supuestos o prejuicios a priori que no siempre son válidos. Y como tú mismo te habrás dado cuenta, en el razonamiento anterior hemos introducido "de contrabando" algunos prejuicios clásicos que no son válidos en la RE. Precisamente, la aportación revolucionaria de Einstein fue el descubrimiento de que esta contradicción aparente era debida a los supuestos implícitos en la transformación de Galileo, es decir, a los conceptos newtonianos de espacio y tiempo absoluto; hemos supuesto a priori que ambos observadores miden el tiempo y el espacio de la misma manera, supuesto que es necesario para deducir la transformación de Galileo. Si abandonamos este supuesto implícito ("de contrabando") y nos atenemos exclusivamente a los principios de la RE (PR y PI), deduciremos las transformaciones de Lorentz para el espacio y para el tiempo, y de ellas las transformaciones

de Einstein para las velocidades. Si aplicamos las transformaciones de Einstein (y no las de Galileo, que sólo son válidas para velocidades relativas pequeñas, pero no para la luz), veremos que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores y que todo cuadra. La paradoja sólo es aparente, y no hay ninguna paradoja-contradicción.

Una vez más, yo no veo contradicciones. A partir de los principios PR y PI, junto a alguna suposición plenamente aceptable y admitida también en el conjunto de la física (homogeneidad e isotropía del espacio), se construye toda la RE, incluidos todos los efectos contrarios al "sentido común vulgar" (relatividad de la simultaneidad, dilatación del tiempo, contracción de la longitud, aumento de la masa, equivalencia entre masa y energía...) que, por muy "extraños" que nos parezcan (puesto que no nos movemos a velocidades relativistas), hasta la fecha concuerdan perfectamente con las observaciones.

Si tú deseas seguir manteniendo que los principios de la RE llevan a contradicciones, deberías mostrar explícitamente alguna verdadera contradicción, y alguna alternativa para resolverla. Me refiero a contradicciones reales (creo que he argumentado suficientemente que lo que tú señalas como paradojas no son contradicciones), del tipo: la RE predice, para un mismo experimento, la consecuencia observable A y la consecuencia observable no A, o bien del tipo el acontecimiento B se produce y el acontecimiento B no se produce. Si logras encontrar alguna de éstas y la publicas, junto con su solución, habrás prestado un gran servicio a la ciencia.

Los sistemas comóviles

Como ya he mencionado anteriormente, y como tú citas en algunos lugares de tu sitio, verdaderamente existe un sistema inercial especial (más bien una colección infinita de ellos, cada uno con centro en un punto del Universo y con elección libre de los ejes, pero de forma que no giren). Para cada punto del Universo, sería el sistema (o colección de sistemas, puesto que la dirección de los ejes es libre) para el cual la radiación de fondo de microondas del universo fuera isótropa. Es lo que se suele llamar "sistema de referencia comóvil con la radiación de fondo del universo", SRCRFU). Cualquier otro sistema inercial que se mueva respecto a un sistema SRCRFU no será un sistema SRCRFU, y la radiación de fondo de microondas no será isótropa, a causa del efecto Doppler.

No negaré que los sistemas SRCRFU tienen ventajas, pues permiten definir algo parecido a "velocidades absolutas", que no son más que velocidades relativas en el sistema SRCRFU, y permiten definir una escala de tiempo universal a partir del big bang: sería la duración propia de un observador en reposo respecto a un sistema SRCRFU. Pero como la velocidad de la Tierra (y de la mayor parte de las galaxias, que yo sepa) respecto al sistema SRCRFU es muy pequeña comparada con la de la luz, la edad aproximada del Universo que se suele dar (15.000 millones de años; esto no es más que la inversa de la constante de Hubble) es válida para el SRCRFU, para la Tierra y para la inmensa mayoría de observadores reales que pueda haber en cualquier galaxia.

Pero, atención, la existencia del SRCRFU no invalida la RE, pues si en un sistema SRCRFU se cumplen las leyes de la física, particularmente las ecuaciones de Maxwell y concretamente la ley de constancia de la velocidad de la luz c , en cualquier otro sistema inercial que no sea SRCRFU también se cumplen las leyes de la física, particularmente las ecuaciones de Maxwell y concretamente la ley de constancia de la velocidad de la luz c . Lo que se suele llamar alegremente "velocidad absoluta" no es más que la velocidad respecto al fondo de radiación de microondas, y no se manifiesta más que en la observación de este fenómeno (yo también puedo llamar, si quiero, "velocidad absoluta" a la velocidad de cualquier móvil respecto a mi casa, pero eso no afecta para nada a la validez y coherencia de la RE). Por lo que afecta al resto de los fenómenos del Universo y a todas las leyes de la física, todos los sistemas inerciales son equivalentes. Y la existencia de sistemas SRCRFU no implica la aparición repentina de contradicciones en la RE, donde antes no había.

En particular hay que aclarar que la existencia de sistemas comóviles SRCRFU no invalida las hipótesis de homogeneidad e isotropía del espacio, cosa que podría servir de argumento para justificar alguna de tus afirmaciones (concretamente, la eventual diferencia de velocidad entre los rayos de ida y vuelta), o al menos no la invalida en el sentido que yo he defendido (la validez de las leyes de la física independientemente del lugar y de la dirección). El hecho de que se observe

un corrimiento hacia el rojo distinto en distintas direcciones se debe a una circunstancia local, que es el movimiento local de la Tierra, del Sol y de nuestra galaxia. Precisamente el efecto Doppler, base del corrimiento hacia el rojo, se deduce, como toda la física, asumiendo la isotropía del espacio. Esta isotropía se pone de manifiesto en el hecho de que, si nos moviésemos en dirección contraria respecto al SRCRFU de la dirección en que nos movemos, observaríamos una variación de la radiación de fondo precisamente contraria a la que observamos. Repito, la homogeneidad e isotropía del espacio es global, prescindiendo de efectos de la distribución de materia o de movimientos locales.

Valencia, septiembre de 2003.

José García Illa

joyamaan@terra.es