

Capítulo VII

“El mundo no podrá superar su actual estado de crisis empleando los mismos razonamientos que originaron el problema”

A. Einstein

LOS GEMELOS

Como comenté al comienzo de esta obra, en los desarrollos que siguen doy por sentado que el lector está familiarizado con la “historia” de los gemelos de la relatividad especial de Einstein.

Los físicos que trabajan en las áreas principales de investigación suelen considerar la paradoja de los gemelos como un mero entretenimiento para estudiantes y regularmente niegan la existencia de una paradoja.

En coincidencia con la versión oficial, la función de los análisis que presento en este capítulo es la de demostrar por qué esta supuesta paradoja no es tal. Pero mi camino es un poco diferente. 😊

El capítulo VI contiene todos los argumentos necesarios para borrar definitivamente la paradoja de los gemelos de los libros de física. Sin embargo, no es fácil luchar contra 100 años de historia y ríos de tinta dedicados a discutirla. En consecuencia este capítulo es extenso y algunos argumentos deben parecer inútilmente reiterativos.

Es inevitable.

Pretendo eliminar la forma convencional de ver la Relatividad Especial, para amigarla con el sentido común. Pero... mucha gente cree, a fuerza de leerlo reiteradamente, que la Relatividad Especial es el máximo logro del sentido común.

La tarea es ardua.

Mis expectativas de lograrlo son escasas. Para esta afirmación me baso en la experiencia de muchos años de diálogo con quienes tienen arraigado el concepto de que la Relatividad Especial es una teoría demostrada, cuando lo único demostrado es la validez de sus ecuaciones.

Pero..., creo que vale la pena intentarlo.

Va mi mejor esfuerzo, comenzando desde la forma de enseñar Relatividad Especial y terminando con un ameno viaje al lado de cada uno de los gemelos.

LA ENSEÑANZA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL.

Estaba cursando el quinto año de la escuela primaria cuando la maestra (maravillosa “señorita” Rita) nos pidió que definiéramos un triángulo con nuestras propias palabras. El resultado fue sorprendente y divertido. Luego de intentar algo así como “es una figura triangular” y otras variantes poéticas, al cuarto o quinto intento, alguien (¿María Eugenia?) llegó a aproximarse a una definición razonable diciendo “es una figura con tres líneas rectas que se cortan”. La “malvada” señorita dibujó

las tres líneas cortándose en un solo punto. Cumplía con la definición pero no era un triángulo. Pero estábamos acercándonos a una definición correcta y éramos varios los que desesperadamente levantábamos la mano para dar la respuesta que creíamos irrefutable.

Nos quedamos con la mano levantada, pues la señorita, decidió darnos la respuesta correcta.

Sólo para completar la historia, si mal no recuerdo, lo que dijo fue: “es el espacio (o la figura) geométrico delimitado por tres líneas rectas que se cruzan de a pares”.

De acuerdo, la definición oficial resultó irrefutable. No había manera de hacer una figura que cumpliera con la definición y que no fuera un triángulo.

El objetivo del ejercicio era doble. Estábamos por empezar a trabajar en el mundo de los triángulos y necesitábamos una definición adecuada. Y además nos enseñó la importancia de las definiciones correctas y no ambiguas o falsas. Pero también nos enseñó (sin quererlo) que la autoridad (ella) podía fijar el límite de lo que quería que descubriéramos con nuestras propias deducciones y tanteos. Y, por favor, no estoy criticando la manera de llevar la clase. Al contrario, al menos en mi caso logró sobradamente el objetivo que se había fijado. Sólo quiero resaltar que el que está al frente de la enseñanza está, habitualmente, al control de las variables del aprendizaje.

Y volviendo a la paradoja de los gemelos. No hay curso de relatividad donde no se discuta esta paradoja.

Imposible no hacerlo. Si hasta el mismo Einstein la introdujo en su trabajo de 1905 para ejemplificar las consecuencias de su teoría.

Pero cuando las papas queman, y los alumnos empiezan a encontrar fallas en la respuesta oficial, todos los profesores que he conocido hacen lo mismo: Dicen algo así como: *“Bueno..., en realidad, esta paradoja se resuelve con la relatividad general (y por lo tanto no es una paradoja), pero esa es una teoría mucho más complicada. La relatividad especial no es adecuada para resolver problemas con aceleraciones”*.

Y punto.

Muchos nos quedamos con la mano levantada esperando una aclaración mejor.

La gran mayoría nunca toma un curso de relatividad general. Y los que lo toman suelen estar más preocupados por las ecuaciones que por los conceptos, de modo que la paradoja de los gemelos es un tema siempre pendiente.

Y, como veremos, afirmar a que la relatividad especial no contempla aceleraciones es una falacia popularizada, justamente, para evitar el análisis de situaciones que ponen de manifiesto las fallas lógicas de la Relatividad Especial.

UNA VERDADERA PARADOJA

El sistema solar completa un giro a la Galaxia en unos 200 millones de años con una velocidad del orden de 200 km/s. **Nota:** *nuevamente estoy empleando valores aproximados, solo para facilitar el seguimiento del ejemplo.*

Este giro orbital, alrededor del centro galáctico, es el resultado de la atracción gravitatoria neta ejercida por los diversos componentes de la Vía Láctea.

Pese a la gran cantidad de materia que forma nuestra galaxia, el campo gravitatorio es extremadamente débil como resultado de la enorme distancia que nos separa de las demás estrellas. Los cálculos pertinentes indican que esta atracción gravitatoria es cercana a 10^{-12} g (un millón de millones de veces más débil que la atracción gravitatoria que ejerce La Tierra sobre nosotros en su superficie).

En consecuencia, tal como se analizó en el preludeo a este capítulo, podemos considerar que el sistema solar se desplaza, en primera aproximación, como un sistema inercial. De este modo resultan aplicables, con razonable exactitud, las ecuaciones de la Relatividad Especial.

Si existiera una estrella, con sus respectivos planetas, orbitando la Vía Láctea a igual distancia del centro galáctico que el sistema solar, pero en sentido contrario, podríamos imaginar un experimento conjunto entre sus habitantes y nosotros.

Imaginemos, para redondear el experimento, que la órbita de este otro sistema solar está separada 1 año luz de la que describe el Sol y su sistema planetario. En su versión más simple, ambas órbitas serían circunferencias superpuestas de un diámetro cercano a 50,000 años luz, separadas por una distancia de 1 año luz.

Teniendo en cuenta la demora de la luz para llegar de un planeta al otro, durante un cruce determinado, en el momento de máximo acercamiento, los observadores de ambos sistemas fijan el tiempo cero del experimento.

Dejando de lado que los caminos orbitales se cruzarían nuevamente a mitad del recorrido de una vuelta completa a la galaxia, podemos analizar el estado de situación 200 millones de años después, en el punto equivalente al del comienzo de la experiencia.

Como cada sistema tiene una velocidad tangencial de 200 km/s, la velocidad relativa entre ambos sistemas solares sería de unos 400 km/s. A esta velocidad le corresponde a un coeficiente de Lorentz de 0.99999911, y este coeficiente conduce, a lo largo de 200 millones de años, a una diferencia acumulada de unos 177 años entre un cruce y el siguiente.

En el segundo cruce, la distancia entre los sistemas sería, nuevamente, de sólo un año luz, de modo que no sería difícil detectar si los relojes de uno de los sistemas atrasan 177 años respecto a los relojes del otro sistema.

***Nota:** En la actualidad se han construido relojes atómicos con una precisión de uno en 10^{15} . Esta precisión equivale a diferencias de 1 segundo en unos treinta millones de años.*

Pero...de acuerdo con la Relatividad Especial, nuestros relojes deben atrasar 177 años con respecto a los relojes del otro sistema y los del otro sistema deben atrasar 177 años con respecto a los nuestros.

En el momento del cruce esta situación es IMPOSIBLE, porque la comparación es directa con una separación de sólo un año luz.

Ambos juegos de relojes NO PUEDEN atrasar SIMULTÁNEAMENTE, uno con

respecto al otro, en la magnitud indicada.

Discusión

Posible Invalidación de la experiencia

Puede argumentarse, siguiendo el estilo clásico de los argumentos relativistas, que el campo gravitatorio de la galaxia invalida los cálculos. Sin embargo, además de la increíblemente débil acción gravitatoria que, como se mostró en el preludio a este capítulo, puede desglosarse del efecto de velocidad relativa, una consideración simple permite descartar tal argumento:

- Ambos sistemas están sometidos EXACTAMENTE al mismo campo gravitatorio. Por lo tanto el cálculo final puede resultar algo diferente cuantitativamente, pero no cualitativamente. El efecto de la velocidad relativa DEBE manifestarse superpuesto a cualquier efecto de la gravedad. Y como el efecto gravitatorio es idéntico, el atraso de relojes en traslación relativa, aunque con un valor diferente del calculado, DEBE persistir.

También puede argumentarse que el atraso relativo que se observa durante el período de cruce, se compensa con un adelanto relativo mientras los planetas están alejados.

- Este argumento no es sostenible, pues la marcha a ritmo constante de ambos relojes puede verificarse con un hipotético tercer observador ubicado en el centro de la galaxia, que reciba pulsos permanentes de los relojes de ambos sistemas. Ese tercer observador, no sometido al giro orbital, aunque marchando a un ritmo diferente por acción gravitatoria y por velocidad relativa, indicaría que los sistemas marchan a ritmo constante durante TODA la experiencia.
- Además, para facilitar el análisis puede considerarse que ambos sistemas planetarios forman parte de una gran “cadena” de sistemas planetarios, dando lugar a dos gigantescas ruedas que giran en sentido contrario y con centro en el centro de la galaxia. En este caso, TODOS los planetas de una de las ruedas confirmarían que los relojes de un determinado planeta de la otra rueda, atrasa con respecto a sus propios relojes cuando se cruzan en su camino orbital. Y esta observación sería recíproca entre las dos “cadenas” de sistemas solares.

La Relatividad Especial y sus fallas

Podemos resumir el desarrollo previo:

1. La Tierra se cruza con un planeta que orbita la galaxia en sentido “retrógrado”.
2. La velocidad relativa (400 km/s) origina un atraso en las lecturas cruzadas de los relojes de ambos sistemas. Desde los dos sistemas se mide experimentalmente que TODOS los relojes del otro sistema marchan más lentamente con un factor de 0.99999911.
3. Los sistemas siguen sus giros respectivos sin alterar para nada sus condiciones de traslado.

4. 200 millones de años más tarde, ambos planetas vuelven a encontrarse. Por la marcha diferente de los relojes en ambos planetas, en ese período se acumula una diferencia de 177 años.
5. Conforme a la Relatividad Especial, en el momento del cruce, los relojes de La Tierra deben atrasar 177 años respecto a los del otro planeta. Pero también deben atrasar 177 años los relojes del otro planeta respecto a los de La Tierra. La situación es imposible, particularmente porque la separación de ambos planetas es de sólo 1 año luz, de modo que la confrontación de relojes se hace en un período mucho menor que lo que involucra la supuesta diferencia acumulada.

Puede afirmarse, entonces, que la contradicción presentada no tiene solución dentro del ámbito de la interpretación convencional de la Relatividad Especial.

Nota: *Que no tenga solución para la Relatividad Especial no quiere decir que la experiencia no pueda realizarse. De hecho satélites orbitando La Tierra, en giros opuestos, permiten reproducir esta experiencia a pequeña escala.*

Como puede observarse, este experimento hipotético no es más que una variante de la famosa paradoja de los Gemelos. Y como tal, quienes interpretan la Relatividad Especial en forma convencional, se niegan a analizarlo, no porque no puedan sino porque pone en evidencia las fallas de su interpretación.

La diferencia entre este ejemplo y el planteo convencional de la paradoja, es que ambos sistemas son idénticos y, por lo tanto no puede asignarse un comportamiento diferente a los relojes de uno y otro de los gemelos.

El argumento típico para negar la validez de estas experiencias es que la existencia de campos gravitatorios invalida el análisis.

Pero..., este punto fue analizado en detalle en el preludio a este capítulo. De lo expresado en dicho desarrollo conviene recordar que sobre La Tierra se han llevado a cabo numerosas experiencias que confirman las predicciones de la Relatividad Especial. Por lo tanto NO ES VÁLIDO afirmar que los campos gravitatorios de La Tierra, El Sol o la Vía Láctea impiden la aplicación de las transformadas de Lorentz en sistemas solidarios a La Tierra, para sistemas con velocidades relativas significativas. De hecho, para este análisis he elegido las condiciones propias de nuestro planeta con el fin de eliminar el argumento de la presencia de campos gravitatorios de esta intensidad como factores que puedan invalidar el análisis.

Como consecuencia, dado que la experiencia puede analizarse dentro del ámbito de la Relatividad Especial, es necesario tomar partido por una de dos soluciones posibles.

1. El atraso relativo de los relojes, medido durante el cruce de ambos sistemas, es real. En otras palabras, una instantánea mágica confirmaría que un juego de relojes marcha más lento que el otro.
2. El atraso relativo de los relojes, medido durante el cruce de ambos sistemas, es sólo aparente. *En este caso una instantánea mágica mostraría que ambos juegos de relojes marchan al mismo ritmo.*

Dentro de la interpretación convencional de la Relatividad Especial, el primer caso lleva a la necesidad de que en alguna parte del recorrido se recupere el atraso de un

sistema respecto del otro. Pero, como la Relatividad Especial asume que las condiciones son idénticas a lo largo de todo el recorrido, esta hipótesis resulta insostenible.

Pero..., el segundo caso también resulta insostenible para la interpretación ortodoxa de la Relatividad Especial. Si los atrasos entre sistemas con movimiento relativo son sólo aparentes, eso significa que en el planteo convencional de la paradoja de los gemelos, el envejecimiento diferencial entre ellos sólo puede ocurrir en los períodos de aceleración. De esta forma, si planteamos un ejemplo con las siguientes características:

- GemeloA permanece estacionario toda su vida.
- Cuando cumplen 20 años, GemeloB emprende un viaje de Ida y Vuelta a velocidades relativistas.
- El viaje insume 4 períodos de aceleración y frenado de un mes cada uno. Estos tiempos son medidos por GemeloA o algunos ayudantes estacionarios con respecto a él.
- El viaje se prolonga durante 60 años para GemeloA, pero GemeloB sólo registra el paso de 30 años durante la experiencia.
- Cuando se re-encuentran ambos gemelos comprueban que GemeloA tiene 80 años, mientras GemeloB sólo acusa 50.

Si, conforme a la segunda hipótesis, no podemos atribuir la diferencia de 30 años a los períodos inerciales, es necesario atribuírselos a los períodos de aceleración. Y esto sí que es problemático, porque el único gemelo que sufrió aceleraciones es GemeloB Y SÓLO ESTUVO SOMETIDO A ACELERACIONES DURANTE 4 MESES.

***Nota:** Los 4 meses de aceleración, medidos por GemeloA, entran dentro del campo de análisis de la Relatividad Especial pues GemeloA permanece en un sistema inercial toda su vida.*

De esta forma deberíamos concluir que GemeloB REJUVENECIÓ 30 años como consecuencia de sus períodos de aceleración.

Me explico mejor: Si la marcha de los relojes durante el período inercial es la misma, en el sentido que proporcionan las instantáneas mágicas, la única opción es que las alteraciones se produzcan durante las aceleraciones. Pero si las aceleraciones duran 4 meses, no es posible que un mecanismo biológico atrase 30 años durante ese lapso. Lo máximo que podría atrasar un reloj en 4 meses es, justamente, 4 meses. Esto ocurriría con un reloj detenido. Un reloj que atrase 30 años en cuatro meses debe marchar vertiginosamente hacia atrás en este período.

***Nota:** La negativa a analizar experiencias que muestran las verdaderas inconsistencias lógicas de la Relatividad Especial (las verdaderas paradojas), se parece mucho a la negativa que encontraba Galileo a que, quienes sostenían que todos los astros orbitaban La Tierra, observaran por su telescopio los satélites de Júpiter atravesando la hipotética "esfera celeste" de este planeta.*

La Solución

Siendo imposible que los relojes de ambos sistemas atrasen simultáneamente unos con respecto a los otros, el único resultado aceptable de esta experiencia es que al final del segundo cruce los relojes de ambos sistemas marquen EXACTAMENTE el mismo tiempo acumulado desde el primer cruce.

Nota: Los satélites en órbita confirman, naturalmente, este resultado.

Este resultado, imposible de explicar mediante la óptica convencional de la Relatividad Especial, se obtiene en forma natural mediante el empleo de **MRLE**.

En este caso, si la órbita se desplaza respecto al **MRLE**, los relojes marchan a ritmo variable de acuerdo a su velocidad relativa respecto al **MRLE** en los diferentes puntos de su recorrido orbital. Pero..., al final del recorrido ambos sistemas habrán sufrido las mismas alteraciones acumulativas VERDADERAS. De este modo, al enfrentarse, registran EXACTAMENTE el mismo tiempo acumulado.

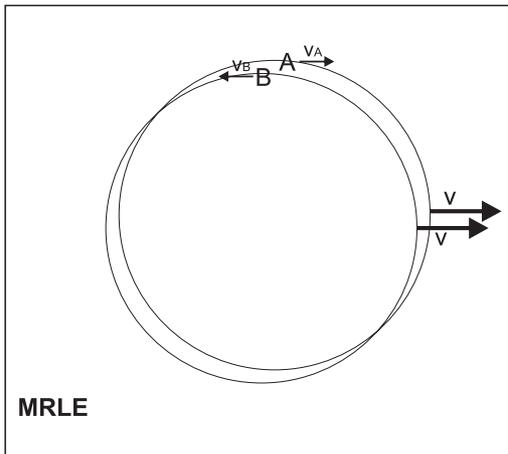


Fig VII-1: Los sistemas **A** y **B** describen órbitas circulares contrapuestas. Las órbitas se desplazan a velocidad v respecto al **MRLE**

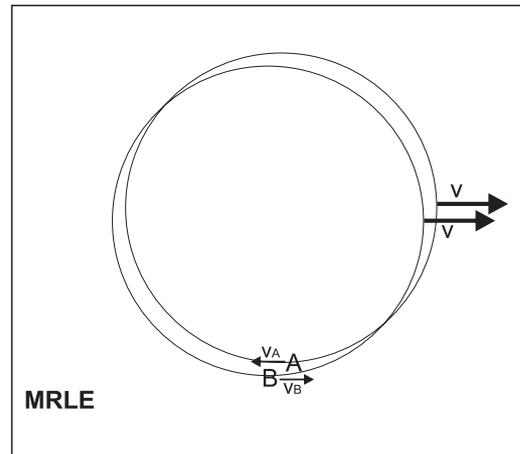


Fig VII-2: Al recorrer media órbita, los sistemas **A** y **B** se enfrentan nuevamente pero están invertidos los sentidos de desplazamiento orbital respecto al **MRLE**

La Fig. VII-1 muestra dos sistemas (**A** y **B**) en órbitas circulares con giros contrapuestos. El centro de cada órbita se desplaza a velocidad v con respecto al **MRLE**. De este modo entre **A** y **B** funcionan las transformadas de Lorentz, pero la velocidad orbital de **A** (v_A) se suma a la velocidad v , en tanto que la velocidad orbital de **B** (v_B) se resta de la velocidad v , tal como se observa desde el sistema realmente estacionario.

Nota: En realidad las órbitas no serían circulares, desde el punto de vista del **MRLE**, y los módulos de v_A y v_B no serían idénticos. El diagrama de la Fig. VII-1 debe tomarse sólo como conceptual.

La Fig. VII-2 muestra los dos sistemas en otra ubicación de sus órbitas circulares. Nuevamente entre **A** y **B** funcionan las transformadas de Lorentz, pero ahora es la velocidad orbital de **A** la que se resta a la velocidad v , en tanto que la velocidad orbital de **B** se suma a v .

En otras palabras: Las transformadas de Lorentz son una excelente aproximación en cada pequeño arco de las órbitas (durante el cruce de los sistemas planetarios). Pero la acumulación de tiempos para TODA la órbita no es correcta porque en cada tramo los relojes de ambos sistemas marchan a diferente ritmo (vistos desde el MRLE). En consecuencia, dado que ambos sistemas pasan por puntos equivalentes, la suma real de adelantos y atrasos es idéntica para ambos sistemas planetarios.

UNA DEMOSTRACIÓN POR EL ABSURDO

Dejando de lado la “experiencia” del punto previo, supongamos que la explicación clásica de la paradoja de los gemelos es correcta. Eso significa que si uno de los sistemas sufre aceleraciones diferentes a las que sufre el otro, se rompe la equivalencia entre sistemas en movimiento lineal relativo uniforme.

En ese caso, aunque parezca increíble, se afecta toda la estructura “lógica” de la Relatividad, pues las preguntas que surgen son las siguientes:

- ¿La traslación relativa entre dos sistemas no es el resultado de aceleraciones diferentes sufridas en algún momento de la historia previa de ambos sistemas?
- ¿Hay otra forma de obtener movimientos relativos?

A modo de ejemplo, las teorías cosmológicas aceptadas actualmente (Big-Bang-Inflación, etc.) suponen que la expansión era uniforme al comienzo de la historia del cosmos. Para que dos sistemas se crucen en sus trayectorias actuales, tienen que haber sufrido cambios de velocidad en el pasado.

Y no resulta aceptable que la paradoja de los gemelos se resuelva sólo porque se conocen las aceleraciones previas. Debo entender que quienes adhieren a la explicación clásica aceptan que el sistema que no sufrió aceleraciones es un sistema privilegiado respecto del que fue acelerado. Y en ese caso, dicho razonamiento nos llevaría a creer que existen sistemas privilegiados en el Universo: **¡Aquellos que no sufrieron aceleraciones desde la creación del mismo!**

Y no habría sistemas equivalentes puesto que cada uno sufrió cambios diferentes en la historia de velocidades.

LA PRIMERA PARADOJA

La primera referencia a lo que actualmente se conoce como paradoja de los gemelos la realizó Einstein en su artículo de 1905. Es muy ilustrativo analizar su propia explicación al respecto. En ese caso Einstein detalló una experiencia (sólo imaginable en ese momento) de sistemas en movimiento relativo, empleando los siguientes términos:

*“...A partir de esto se obtiene la siguiente llamativa consecuencia. Si en los puntos **A** y **B** del sistema rígido **K** hay relojes estacionarios que son sincrónicos de acuerdo con las observaciones realizadas en el mismo sistema estacionario **K**, y si el reloj de **A** se mueve con la velocidad **v** hacia **B**, entonces, a su arribo a **B** los dos relojes dejarán de ser sincrónicos. El reloj trasladado desde **A** hasta **B** atrasará con respecto al reloj que permaneció estacionario en **B** de acuerdo con la magnitud $\frac{1}{2} tv^2/c^2$ siendo *t* el tiempo involucrado en el traslado.*”

*Parece razonable que este resultado es igualmente válido si el traslado de **A** hacia **B** procede a través de una poligonal, e incluso si los puntos **A** y **B** son coincidentes (salida desde **A**, recorrido de una poligonal y retorno al mismo punto).*

*Si asumimos que el resultado probado para una poligonal es también válido para una línea curva continua, obtenemos el siguiente resultado: Si uno de los dos relojes sincrónicos de **A** se mueve en una curva cerrada con velocidad constante hasta que retorna a **A**, y el viaje consume t segundos, de acuerdo con las indicaciones del reloj que permaneció en reposo, el reloj viajero atrasará $\frac{1}{2} tv^2/c^2$ en el momento de su retorno al punto de partida.*

De esta forma concluimos que un reloj en el Ecuador debe marchar más lentamente (por una muy pequeña cantidad) que un reloj similar situado en un polo, si todo el resto de las condiciones son idénticas.....”

En 1905 no había relojes que permitieran esa comparación y era impensable hablar de relojes en órbita. Pero el texto de Einstein deja en claro lo que se espera que ocurra (como realmente ocurre) con relojes en órbitas circulares.

De todos modos esto nos lleva a una situación similar a la del primer análisis de este capítulo. Si con giros Este-Oeste y Oeste-Este, se obtuviera el mismo atraso con respecto al reloj estacionario, ¿cómo es posible que no haya atrasos entre sí para los dos relojes en movimiento relativo (y al doble de velocidad relativa por girar en sentido opuesto)?

CONCLUSIONES PRELIMINARES

Con cualquiera de los dos análisis realizados se muestra que la paradoja de los gemelos es un obstáculo muy incómodo para la estructura “lógica” (las comillas son intencionales) de la Relatividad Especial. Sin embargo una falla en la lógica de la Relatividad Especial no quiere decir que sus ecuaciones deban modificarse. Como se verá en el análisis de detalle del viaje de los gemelos, las ecuaciones son correctas, pero su interpretación admite variantes.

***Nota:** Quienes, como consecuencia de estos análisis, o mediante análisis propios, concluyen algo así como: “Aunque no se pueda encontrar la manera de justificar la paradoja de los gemelos, eso no significa nada puesto que los resultados experimentales demuestran la validez de la Relatividad Especial”, eso significa que estos lectores todavía creen que el efecto demuestra la causa. En otras palabras, si el acontecimiento **A** implica que se obtenga el resultado **B**, como **B** realmente sucede, está demostrado que **A** ocurrió. Muchísimas causas (o teorías) pueden conducir al mismo efecto (ecuaciones para describir el mundo físico). Y una teoría con dificultades para ser interpretada merece ser revisada toda vez que un nuevo enfoque puede facilitar su comprensión.*

LA RELATIVIDAD ESPECIAL Y LOS SISTEMAS NO INERCIALES

La paradoja de los gemelos es un resultado del postulado de la constancia de la velocidad de la luz para todos los sistemas inerciales.

Como ya se dijo, en la “explicación” o “resolución” clásica se arguye que los gemelos

se diferencian (son no-equivalentes) porque uno de ellos fue sometido a aceleraciones y el otro no. Aunque en un sentido amplio esta explicación es correcta, trataré de mostrar por qué la forma de aplicar esta explicación no es satisfactoria.

Con respecto a este punto quizás sea adecuado citar algunos párrafos escritos por Millikan, en su libro "Electrones, Protones, Fotones, Neutrones y Rayos Cósmicos" escrito a mediados de los años 30 y publicado en español por Espasa-Calpe Argentina en varias ediciones desde 1944.

Millikan fue un experimentador y teórico notable, entre cuyos logros figura la determinación de la carga del electrón, que lo hizo merecedor del Premio Nóbel de Física de 1923.

Haciendo referencia a la explicación de la estructura fina de los espectros, justificada por la corrección relativista de las supuestas órbitas elípticas de los electrones (propuesta por Sommerfeld), dice:

"... El procedimiento teórico adoptado aquí es, en parte, el mismo que empleó Einstein para explicar la precesión en el perihelio de Mercurio, o sea es otro ejemplo de la aplicación de las leyes de la mecánica celeste al dominio de la mecánica atómica. La predicción cuantitativa, sin embargo, de la precesión del perihelio de Mercurio involucra la teoría General de la Relatividad en tanto que la predicción mencionada sólo está relacionada con la Relatividad Especial, dado que la fuerza gravitatoria entre el núcleo y el electrón es prácticamente nula. Esta interpretación relativista de Sommerfeld, de la estructura fina introdujo nuevas posibilidades para la predicción espectroscópica, que tuvieron un éxito extraordinario entre 1919 y 1924 (período en el que se hicieron avances maravillosos en el desarrollo de la teoría atómica).... "

Y más adelante, luego de desarrollar los detalles de la aplicación dice (en texto resaltado):

"... Ninguna fórmula teórica de la historia de la física ha alcanzado triunfos más sensacionales que la fórmula de la relatividad de Sommerfeld en su aplicación a la estructura fina espectroscópica...."

De modo que, frente a la opinión de este gigante de la historia de la Física, me excuso de agregar argumentos para defender la aplicabilidad de la Relatividad Especial a sistemas acelerados no gravitatorios.

*Pero..., sí me atrevo a agregar una **Nota**. Quienes dicen que la Relatividad Especial es una Teoría demostrada en función de que sus ecuaciones son adecuadas para describir el mundo físico, por analogía también deberían concluir que, en función de sus excelentes resultados, Sommerfeld demostró que los electrones tiene órbitas elípticas. ☺*

Lo que sí demostró Sommerfeld es que pueden emplearse las matemáticas de la Relatividad Especial para analizar los sistemas acelerados, incluso con aceleración variable.

LA EX-PARADOJA DE LOS GEMELOS.

En los análisis previos, desde distintos ángulos, se mostró por qué la paradoja de los

gemelos es una molestia real para la consistencia lógica de la Relatividad Especial.

Sin embargo dije, y por supuesto sigo sosteniendo, que las ecuaciones relativistas son correctas.

Llegó, por lo tanto, el momento de tomar en serio la experiencia de los gemelos relativistas y demostrar que su comportamiento no contradice ningún principio lógico, ni va en contra del sentido común.

Sin embargo, el análisis siguiente puede resultar tedioso para aquellos que no estén familiarizados con el análisis de la paradoja de los gemelos, tal como se realiza en los libros de texto sobre Relatividad Especial.

Por esta razón, a quienes no posean la experiencia indicada se les recomienda saltar este desarrollo o recurrir a estos textos convencionales antes de proseguir con el análisis de detalle de la paradoja. Esta recomendación obedece a que durante el análisis se obtienen resultados que son muy llamativos y pueden parecer fuera de contexto si no se conoce la versión "oficial".

***Nota:** La razón por la que no introduzco la versión "oficial" en mis desarrollos es, justamente, para no confundir el mensaje. Además, quienes han llegado a este punto de mis planteos, casi con certeza han adquirido una visión crítica de la Relatividad Especial. En estas condiciones, si planteo el análisis clásico en estas páginas puede creerse que estoy exagerando las deficiencias lógicas de la Relatividad Especial. Por esta razón prefiero que cada lector recurra a una fuente original y pueda sacar sus propias conclusiones.*

En pocas palabras, lo que se verá en el desarrollo siguiente es que, aunque los relojes de un gemelo marchen realmente a menor ritmo que los del otro, sus mediciones lo convencerán de que son los relojes de su hermanos los que marchan a menor ritmo.

Planteo de la Experiencia desde un MRLE

A continuación se analiza la clásica secuencia de alejamiento y acercamiento de los gemelos, pero dentro de un modelo con **Marco de Referencia Localmente Estacionario (MRLE)** en forma similar a lo desarrollado en el capítulo VI.

Durante el desarrollo veremos cómo desaparecen las contradicciones lógicas de la Relatividad Especial sin necesidad de recurrir a las supuestas soluciones aportadas por la Relatividad General.

Para el ejemplo emplearemos un par de gemelos que llamaremos GemeloA y GemeloB, de acuerdo al sistema al que resultan solidarios durante el desarrollo de la experiencia.

A continuación se hace un breve resumen de las características del modelo a analizar.

El sistema **A** está realmente en reposo con respecto al **MRLE** donde la luz se propaga a velocidad $c = 300,000$ km/s en todas direcciones y sentidos.

El sistema **B** se traslada a velocidad $v = 259,808$ km/s con respecto al sistema **A**.

En concordancia con los resultados experimentales, en los dos sistemas se asume que

Los Gemelos

la velocidad de la luz arroja siempre el mismo valor, para experiencias de ida y vuelta.

Siguiendo a Einstein, se hace una suposición razonable que permite realizar el sincronismo de experiencias en cualquier eje: La velocidad de la luz arroja siempre el mismo valor, para experiencias unidireccionales en ambos sistemas inerciales.

De modo que tratemos de analizar lo que ocurre, en todo momento, entre ambos gemelos.

Se inicia la experiencia.

Los cálculos de GemeloA

GemeloB salta al sistema **B**. La aceleración es instantánea para todos los fines prácticos.

***Nota:** En tanto que nosotros sabemos que el sistema **A** es realmente estacionario (por ser solidario al **MRLE**), tanto GemeloA como GemeloB ignoran si alguno de los dos sistemas está en reposo. Todo lo que saben es que la velocidad relativa entre los sistemas es de $0.866 c$ (259,808 km/s). Bien podría ocurrir que GemeloB saltara desde un sistema en movimiento a un sistema en reposo (como un pasajero que salta al pavimento desde un coche en movimiento). La Fig. VII-3 muestra el aspecto del sistema inmediatamente después que GemeloB aborda una nave que viaja a 259,808 km/s.*

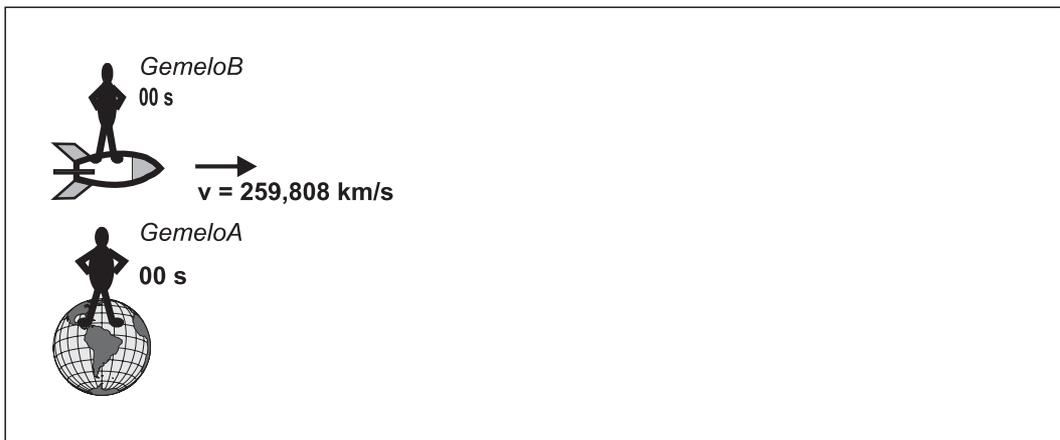


Fig. VII-3: Inicio de la experiencia tal como ve GemeloA ambos sistemas. Ambos relojes marcan 00 s.

La lectura inicial de ambos relojes, la identificamos como **T0A** y **T0B** respectivamente.

- $T0A = T0B = 00 \text{ s}$

Conforme al planteo del modelo que hemos hecho (sistema **A** solidario al **MRLE**), los relojes de GemeloB comienzan a marchar más lentamente (a mitad de ritmo) que los de GemeloA, a partir de ese momento.

Ambos gemelos convinieron, antes de separarse, que cada 10 segundos, GemeloA enviaría una foto de su reloj para que GemeloB registre como marchan las cosas.

Conforme a lo estipulado, a los 10 s GemeloA envía una señal luminosa a GemeloB con una foto de su reloj, señalando el instante convenido. La Fig. VII-4 muestra este momento tal como lo describiría GemeloA. GemeloA continúa enviando una foto cada 10 s, pero sólo estudiaremos (por ahora) lo que ocurre con la primera señal.

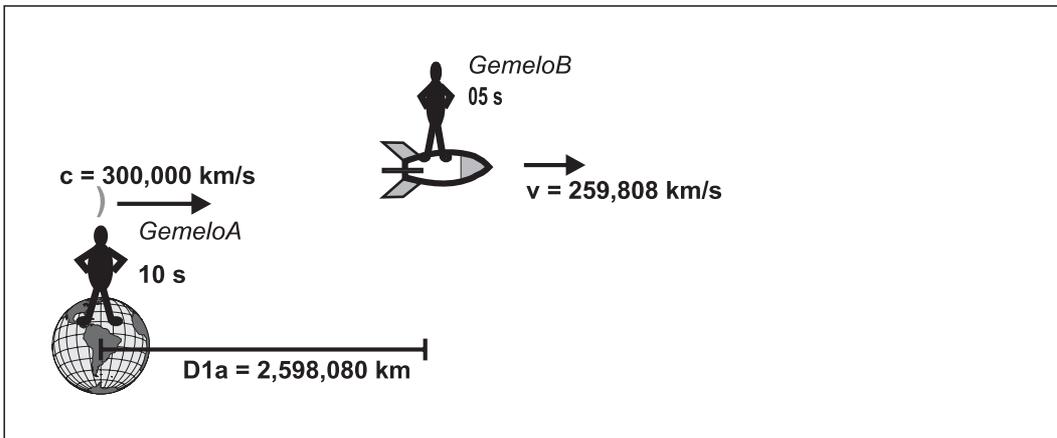


Fig. VII-4: A los 10 s, GemeloA envía su señal luminosa hacia GemeloB. De acuerdo con los cálculos de GemeloA, la distancia que separa a ambos gemelos (**D1A**) es de 2,598,080 km.

Identificamos como (**T1Aa**) a la lectura del reloj de GemeloA en ese momento y como **T1Ba** la correspondiente lectura en el reloj de GemeloB:

- **T1Aa** = 10 s
- **T1Ba** = 05 s

Nota: La letra "a", al final de este tipo de nomenclatura, se emplea para indicar que las lecturas son efectuadas por GemeloA o cualquier observador estacionario con respecto a él.

En ese instante la señal luminosa parte a 300,000 km/s hacia GemeloB.

Como GemeloB se aleja a razón de 259,808 km/s, en el momento que parte la señal. GemeloB se encontraba a

- **D1a** = 259,808 km/s x 10 s = 2,598,080 km

Llamamos (**D1a**) a esta distancia, calculada por GemeloA.

Dado que GemeloB se aleja a 259,808 km/s y la luz lo hace a 300,000 km/s, la señal avanza a razón de 40,192 km/s, para cubrir esta distancia (300,000 – 259.808 = 40,192).

Por lo tanto la señal tarda, según GemeloA, un tiempo **dTa** determinado por:

- **dTa** = 2,598,080 km / 40,192 km/s = 64.64 s

De este modo, cuando la señal llega a la posición de GemeloB, el reloj de GemeloA avanzó hasta la lectura **T2Aa**:

- **T2Aa** = **T1Aa** + **dTa**
- **T2Aa** = 10.00 s + 64.64 s = 74.64 s

Los Gemelos

Y la distancia recorrida por GemeloB es

- $D2a = D1a + v \times dTa$
- $D2a = 2,598,080 \text{ km} + 259,808 \text{ km/s} \times 64.64 \text{ s} = 19,392,516 \text{ km}$

Sabemos, en base a las transformadas de Lorentz, que en ese intervalo, el reloj de GemeloB avanzó solo la mitad del intervalo registrado por el reloj de GemeloA

Por lo que su reloj marca:

- $T2Ba = T1Ba / 2 = 74.64 / 2 = 37.32 \text{ s}$, cuando recibe la información

La Fig. VII-5 muestra el estado de cosas en dicho instante, en base a las observaciones que realiza GemeloA.

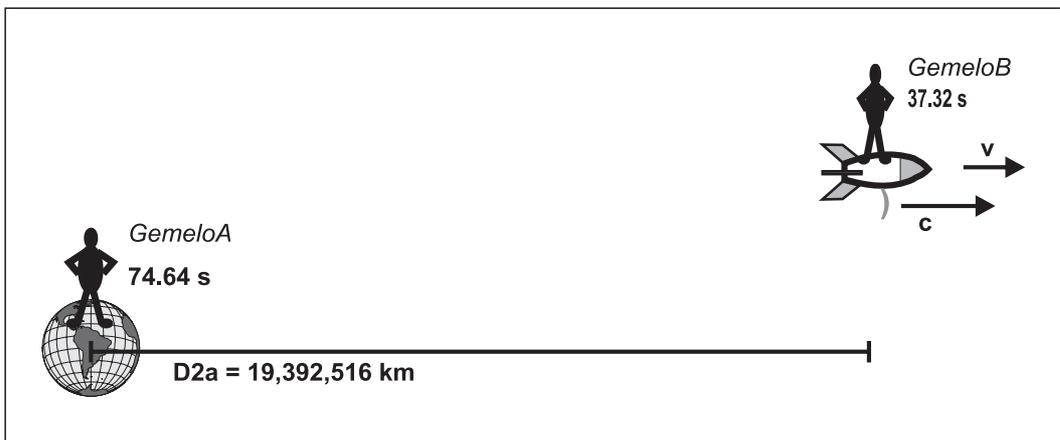


Fig. VII-5: Momento en que la señal, enviada a los 10 s por GemeloA, alcanza la posición de GemeloB. En la figura se indican las lecturas de los relojes y distancias tal como los determina GemeloA.

Los cálculos de GemeloB

De acuerdo con el modelo planteado (GemeloA estacionario respecto al MRLE), la luz avanza a 40,192 km/s ($300,000 - 259.808 = 40,192$) hacia GemeloB. Pero, GemeloB asumiendo que la luz avanza a 300,000 km/s puede calcular cuánto había avanzado su propio reloj en el momento en que GemeloA envió la señal.

Como vimos, en el momento de recibir la señal, el reloj de GemeloB registra 37.32 s (los dos observadores coinciden en esta observación)

Nota: Esta coincidencia en la apreciación de la lectura del reloj de GemeloB cuando recibe la señal luminosa es obligatoria puesto que la llegada de la señal coincide en tiempo y lugar con la indicación del reloj de GemeloB. Si GemeloA empleara un súper telescopio para ver el impacto de la señal luminosa en una pantalla solidaria a GemeloB, podría ver la indicación del reloj de GemeloB en ese mismo instante.

Como GemeloB se está alejando a 259,808 km/s (ambos sistemas coinciden al apreciar la velocidad relativa), sus cálculos le indican que se encuentra a una distancia final:

- $D2b = 259,808 \text{ km/s} \times 37.32 \text{ s} = 9,696,258 \text{ km}$

Esta es la distancia que, según GemeloB, lo separa de la posición de GemeloA en el instante en que recibe la señal luminosa.

Nota: Esta distancia es la mitad que la que estima GemeloA en el momento que la señal luminosa alcanza a GemeloB pues ya vimos que el intervalo que registró el reloj de GemeloA es el doble de lo que registró el de GemeloB. La constancia de c exige que las distancias y ritmos se alteren en forma proporcional.

La Fig. VII-6 muestra el estado inicial de la experiencia, conforme a la apreciación de GemeloB.

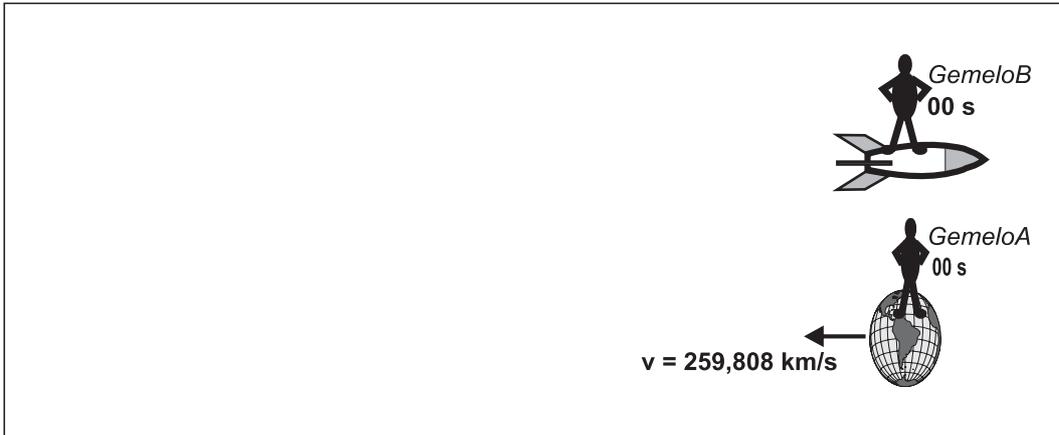


Fig. VII-6: El mismo instante de comienzo de la experiencia que muestra la Fig. VII-3, pero desde la óptica de GemeloB.

En esta figura puede apreciarse que, luego de la aceleración instantánea, GemeloB se siente nuevamente en reposo mientras que es GemeloA quién se aleja de su posición a la velocidad de 259,808 km/s.

De acuerdo a lo convenido, cuando su reloj indique 10 s, GemeloA debe enviar la señal hacia la posición de GemeloB. La Fig. VII-7 muestra dicho instante. Las longitudes y tiempos pueden ser diferentes a los que obtuvo GemeloA.

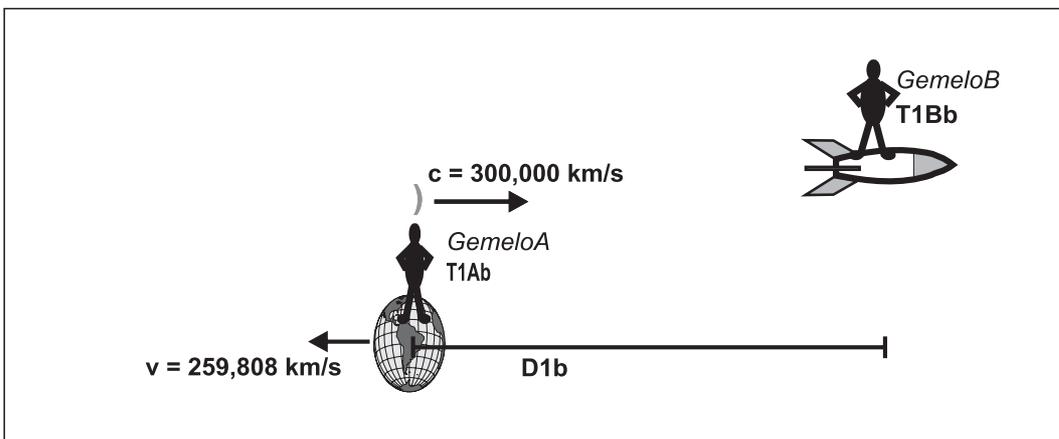


Fig. VII-7: Momento en que parte la señal, enviada por GemeloA, conforme a lo que aprecia GemeloB.

Los Gemelos

La distancia que separa a ambos gemelos en el momento de envío de la señal se identifica como **D1b** pues corresponde a la apreciación hecha por GemeloB. De acuerdo con este gemelo, la luz debe recorrer esta distancia a velocidad **c**, hasta alcanzar su posición, en el momento **T2Bb**.

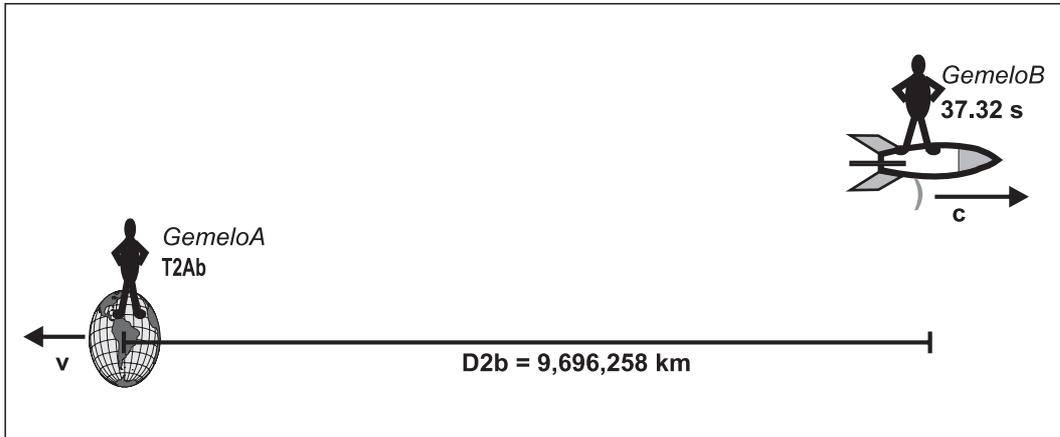


Fig. VII-8: El instante de final de la experiencia desde la óptica de GemeloB.

El arribo de la señal, conforme a las apreciaciones de GemeloB se muestra en la Fig. VII-8

En la Fig. VII-8 puede apreciarse que la lectura del reloj de GemeloB coincide con la apreciación hecha por GemeloA. Este hecho ya fue explicado en base a que la llegada de la señal define un único instante con la posición del reloj de GemeloB.

Por otro lado, como ya se indicó, la distancia **D2b** es la mitad de **D2a** como consecuencia de que la velocidad relativa es la misma (259,808 km/s), pero para GemeloA transcurrió el doble de tiempo que para GemeloB desde el inicio de la experiencia.

Con toda esta información GemeloB está en condiciones de plantear las siguientes ecuaciones.

- $D1b = T1Bb \times 259,808 \text{ km/s}$. Esta es la distancia recorrida, a la velocidad relativa entre ambos sistemas, mientras transcurren $T1Bb$ s desde el inicio de la experiencia.
- $D1b = (T2Bb - T1Bb) \times 300,000 \text{ km/s}$. Para GemeloB, **D1b** es la distancia recorrida por la luz, a velocidad "c", desde el momento en que GemeloA emitió su señal y $(T2Bb - T1Bb)$ es el tiempo transcurrido desde la emisión de la señal hasta su arribo a la posición de GemeloB.

De modo que igualando ambas expresiones obtenemos

$$\bullet (T2Bb - T1Bb) \times 300,000 = T1Bb \times 259,808$$

De donde, despejando el valor de **T1Bb** se obtiene

$$\bullet T1Bb = T2Bb \times 300,000 / (300,000 + 259,808)$$

- $T1Bb = 37.32 \times 300,000 / 559,808 = 20 \text{ s}$

Quizás resulte sorprendente que, desde el punto de vista de GemeloB, es el reloj de GemeloA el que marcha más lentamente.

De acuerdo a los cálculos de GemeloB, su hermano gemelo dejó transcurrir 20 segundos antes de enviar la señal convenida (recordemos que la señal era una foto con el reloj de GemeloA marcando 10 s).

Este resultado se explica perfectamente (desde la óptica de GemeloB) si el reloj de GemeloA marcha a la mitad del ritmo del reloj de GemeloB. Y, como GemeloB no notó ningún efecto extraño en su reloj (pese al sacudón durante el cambio de sistema), debe suponer que el reloj de su hermano se descompuso en el momento de separarse.

Observación notable: Hemos considerado un sistema acelerado y no hemos encontrado dificultades lógicas ni paradojas en llegar a los resultados de la Relatividad Especial. Sin embargo sabemos, en base a la construcción de la experiencia, que las cosas son sólo aparentes para GemeloB.

Por otro lado, en base al valor obtenido para **T1Bb** resulta

- $D1b = T1Bb \times 259,808 \text{ km/s} = 20 \text{ s} \times 259,808 \text{ km/s} = 5,196,086 \text{ km}$

GemeloB se toma un descanso

Supongamos que en el momento en que recibe la señal de su hermano, GemeloB decide volver al sistema **A**. Otra vez sufre un sacudón y pasa a estar estacionario con respecto a GemeloA.

A partir de ese momento puede verificar que su reloj marcha al mismo ritmo que el de su hermano, pues, comienza a recibir las fotos con una frecuencia de 10 segundos.

Pregunta: ¿Qué pasó durante esta segunda aceleración?

Respuesta: A partir del momento del nuevo cambio de sistema, GemeloB debe verificar su posición. Las anomalías detectadas durante el viaje indican que algo no anduvo bien con la información que se transmitieron entre ambos gemelos. A modo de ejemplo: GemeloB afirma haber recorrido.

- $D2b = 9,696,258 \text{ km}$

En tanto que GemeloA afirma que lo vio alejarse

- $D2a = 19,392,516 \text{ km}$

De modo que deciden verificar la distancia entre ambos (Fig. VII-9).

Cuando GemeloB envía un rayo luminoso, que rebota en un espejo que sostiene GemeloA, descubre que la señal tarda 129.28 s en recorrer el trayecto de ida y vuelta. Este tiempo es exactamente el que corresponde a recorrer dos veces una distancia de 19,392,516 km a una velocidad de 300,000 km/s.

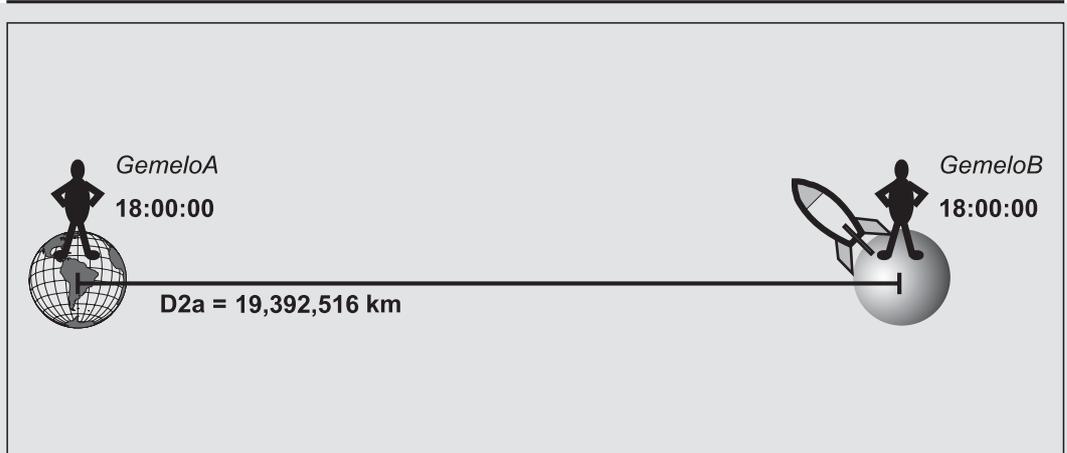


Fig. VII-9: Si GemeloB se detiene, debe admitir que las lecturas hechas por GemeloA son las que describen el resultado final de la experiencia.

En consecuencia GemeloB no tiene más remedio que aceptar que era su hermano el que tenía razón con respecto a las mediciones de distancia. Una vez corregida la distancia, GemeloB también verifica que su reloj atrasa 37.32 s con respecto al reloj de GemeloA.

Pregunta: Pero ... ¿y que pasó con la desaceleración que sufrió GemeloB durante la frenada?

Respuesta: ¡NADA!

Como asumimos que GemeloB era capaz de cambiar de sistema en forma casi instantánea, esa aceleración no insume un tiempo significativo. Como es natural, al no transcurrir tiempos importantes, no pueden producirse adelantos o retrasos significativos de las lecturas.

Durante las aceleraciones o desaceleraciones no pasan cosas casi mágicas como plantean algunas interpretaciones oscurantistas de la Relatividad Especial. Sencillamente durante las etapas de cambio de velocidad se puede estudiar el sistema a cada velocidad intermedia e integrar todo el proceso. En este caso, sólo para simplificar el desarrollo se eligió eliminar las etapas intermedias. Desde el punto de vista del cálculo, la situación es similar a la de un viaje de 1000 años con aceleraciones que duren un mes en cada extremo. En esas condiciones el efecto de las aceleraciones y frenadas resulta despreciable para todos los fines prácticos.

Comentario: Pero ..., las longitudes y atrasos cambiaron enormemente para GemeloB durante la frenada.

Respuesta: ¡NO!. Las longitudes más largas y atrasos de su reloj siempre existieron. Lo que permitió el proceso de frenado, fue que GemeloB pudiera registrar los valores verdaderos.

No ocurre que GemeloB pasó mágicamente de 9,696,258 km a 19,392,516 km de distancia con respecto a GemeloA, sino que sus instrumentos registraban una cosa aparente durante su viaje en el sistema **B**. Las lecturas se acomodaron al volver al sistema **A**.

Con el planteo convencional de la Relatividad Especial este tipo de situación presenta serias complicaciones pues, al postularse la equivalencia verdadera de todos los sistemas inerciales (con independencia de su historia), deben asignarse todos los trastornos a las etapas de aceleración.

En este modelo las cosas son muy simples: Todo lo que importa es la velocidad con respecto al **MRLE**. Y las aceleraciones pueden estudiarse sin recurrir a teorías adicionales. En concordancia con la experiencia, sólo es necesario plantear que la velocidad de la luz siempre parece ser la misma para todos los sistemas en movimiento relativo.

GemeloB emprende el retorno

Antes de partir, los dos gemelos deciden sincronizar nuevamente sus relojes. De este modo, cuando ambos relojes indican 00 s, GemeloB se sube a una nave que viaja a 259,808 km/s pero en sentido contrario al de su primer viaje.

Nuevamente sus relojes comienzan a atrasar, aunque GemeloB registra que son los relojes de GemeloA los que sufren el atraso.

Pero, en este caso la situación se puede simplificar. Conforme a sus registros, GemeloB vuelve a emplear 37.32 s en hacer el recorrido, lo que resulta incompatible con la velocidad de su nave y la distancia recorrida en el viaje inicial.

Para resolver sus dudas, en este caso GemeloB no necesita detener su nave pues cuando pasa frente a su hermano puede verificar que nuevamente es su propio reloj el que atrasa y no el de GemeloA. Pero si decidiera bajarse de la nave podría hacer la misma verificación.

Nuevamente (conforme con el sentido común) las aceleraciones no afectan el desarrollo de la experiencia.

ANÁLISIS Y DISCUSIONES ADICIONALES

Pregunta: ¿Cuáles son las imágenes verdaderas de la experiencia?

Respuesta: En base a como construimos el modelo sabemos que las mediciones realizadas por GemeloA coinciden con el comportamiento real del sistema. En otras palabras, las Figuras VII-3 a VII-5 pueden considerarse instantáneas mágicas de esta experiencia.

GemeloB tiene alterados sus sistemas de medición de tal forma que la imagen que construye, de los mismos acontecimientos es totalmente diferente.

Pregunta: Pero..... si los registros de cada gemelo indican cosas diferentes, como puede asegurarse que uno tiene razón y el otro no?

Respuesta: Bajo la óptica de la Relatividad Especial ninguno de los dos gemelos tiene más razón que el otro y por eso se presentan paradojas. Sin embargo con el modelo desarrollado en este capítulo (**MRLE**), sabemos que GemeloA ha realizado observaciones reales y que las observaciones de GemeloB son sólo aparentes.

Pregunta: ¿Qué hubiera pasado si GemeloB hubiera saltado desde un sistema en

movimiento a $0.866 c$ con respecto al **MRLE** a un sistema en reposo?

Respuesta: Aunque pueda parecer extraño, no hubiera habido ninguna diferencia en los cálculos de ambos gemelos (Sí en las instantáneas mágicas, pero éstas son sólo un recurso imaginario). Esta experiencia no puede poner de manifiesto el movimiento absoluto o, lo que es lo mismo, detectar los **MRLE**. Es una experiencia útil, para entender la equivalencia aparente de los sistemas inerciales, hacer todo el desarrollo con GemeloB “saltando” al **MRLE**, desde un sistema realmente móvil.

Haciendo este análisis lo que se encuentra es que los relojes de GemeloB marchan realmente más rápido que los de GemeloA durante el viaje de “ida” (cuando GemeloB es solidario al **MRLE**) pero atrasan mucho más cuando retorna al lado de su hermano. Durante el período de “vuelta” GemeloB debe moverse a $0.866 c$ respecto a GemeloA que ya se estaba moviendo a $0.866 c$ respecto al **MRLE**. En estas condiciones, la adición de velocidades conduce a una velocidad absoluta (respecto al **MRLE**) de $0.9897 c$, con un coeficiente de Lorentz de 0.143 .

La suma del adelanto real durante la ida y el atraso real durante la vuelta de GemeloB conduce al mismo resultado final para la experiencia. Adicionalmente, merced al efecto recíproco de las transformadas de Lorentz, las observaciones aparentes también son idénticas a las del caso analizado en detalle.

Pregunta: Pero... Si el resultado es siempre el mismo ¿Cómo pueden verificar entre ellos cuál es el que ha hecho observaciones correctas?

Respuesta: Tal como se ha analizado en este desarrollo, frenando y/o acelerando sus sistemas, los dos gemelos pueden volver a encontrarse en posición de reposo relativo. En ese momento es muy fácil comprobar cuál de ellos tenía razón en sus observaciones. Siempre es el gemelo sometido a procesos de aceleración el que sufre las alteraciones verdaderas con respecto a la lectura inicial en reposo relativo.

Comentario: En función de las respuestas previas no parece haber ninguna diferencia entre emplear la interpretación convencional de la Relatividad Especial o la interpretación mediante **MRLE**.

Respuesta: Las diferencias son notables:

- Las aceleraciones no generan ningún efecto mágico sobre los sistemas inerciales. Sólo alteran su estado de movimiento. Y, a la nueva velocidad, los sistemas inerciales siguen respondiendo a las ecuaciones de la Relatividad Especial. Incluso durante las aceleraciones se puede integrar el efecto de los cambios de velocidad y predecir correctamente el estado final del sistema (tal como sugiere la cita de Millikan).
- Las paradojas ni siquiera se plantean. Aceptando que los sistemas inerciales son sólo aparentemente equivalentes, no se generan contradicciones. Las paradojas surgen al admitir como hipótesis, que los sistemas inerciales son REALMENTE equivalentes. En este caso **c** debe ser realmente la misma para todos los sistemas. Con los **MRLE**, **c** es sólo aparentemente constante como resultado de la alteración verdadera de longitudes y tiempos.
- Como ya se vio en capítulos previos, la existencia de **MRLE**, permite re-

considerar un medio soporte para las ondas luminosas y las partículas que llamamos materiales. Esto es un salto cualitativo en nuestra forma de ver o interpretar el mundo físico.

Estos análisis hechos desde la Relatividad Especial siguen dos caminos clásicos:

- Conducen a paradojas, pues pueden imaginarse experiencias en que ambos gemelos sufren idénticos procesos (como en el primer ejemplo de este capítulo) y no puede ocurrir que realmente, en el momento de frenar, se produzca el envejecimiento instantáneo de uno de los gemelos o que ambos sean más viejos que el otro.
- No se analizan, afirmando que la Relatividad General resuelve el problema. Cosa que la Relatividad General por supuesto no hace.

COMENTARIO FINAL

El principal objetivo de este capítulo es el de mostrar que no es necesario renunciar a los marcos de referencia estacionarios (**MRLE**) para describir los fenómenos electromagnéticos entre sistemas inerciales. Las transformadas de Lorentz conducen EXACTAMENTE a los mismos resultados numéricos si se plantea un modelo con Marcos de Referencia o sin ellos. El primer caso resulta compatible con el “sentido común”. El segundo está plagado de paradojas.

Utilizando **MRLE** se pueden estudiar aceleraciones (como ya se vio) o sistemas rotatorios (como se verá con algo más de detalle en un próximo capítulo) sin recurrir a teorías complementarias.