

1.-Relatividad de un rayo láser visible

¿No son los rayos de luz pequeños cuerpos emitidos por sustancias resplandecientes?

Isaac Newton

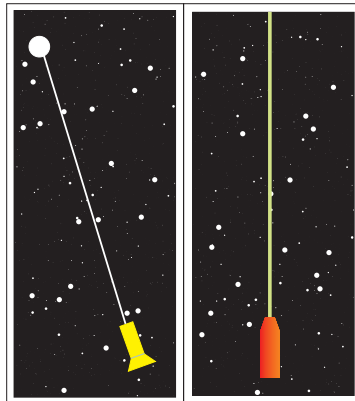


Figure 1.1: Izquierda: Trayectoria deducida de un fotón entre el objeto observado y el instrumento de observación. Derecha: Rayo láser visible

INTRODUCCIÓN

1 Por razones obvias, los fotones protagonizan la mayoría de las discusiones sobre la teoría especial de la relatividad. Por lo general, los fotones se mueven entre dos puntos y luego las trayectorias correspondientes se analizan desde dos o más sistemas de referencia inerciales. Como las trayectorias no son visibles, se representan por líneas rectas que conectan los puntos inicial y final del camino que se supone han seguido los fotones. En este sentido, un rayo láser visible ofrece una ventaja fundamental, ya que la trayectoria completa es visible.

2 La discusión que sigue es un experimento mental que hace uso de un rayo láser visible para plantear el siguiente problema: RF_0 es sistema de referencia inercial de un fuente emisora de láser S que emite un rayo láser visible en la direc-

2 — Relatividad de un rayo láser visible

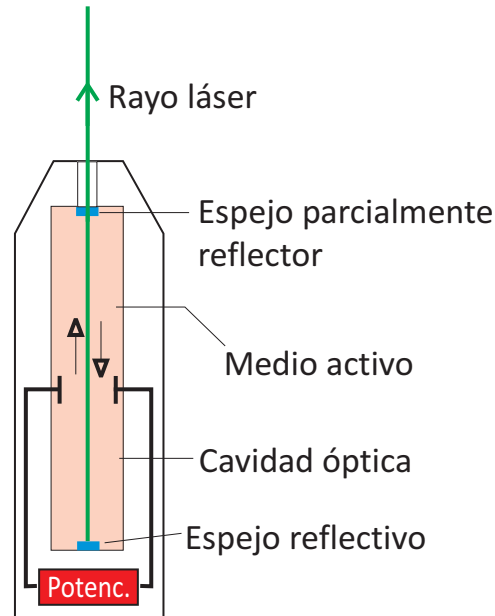


Figure 1.2: Esquema de una fuente emisora de láser. Solo los fotones que se reflejan en la dirección perpendicular a los espejos serán liberados en el rayo láser [1].

ción vertical, es decir, en una dirección ortogonal al eje X_o de RF_o , ¿se verá este rayo láser como una línea vertical en movimiento desde otro sistema inercial que se mueve con relación a RF_o en la dirección paralela a X_o ? Como veremos, la respuesta pone en tela de juicio la interpretación analógica de la teoría de la relatividad especial.

DISCUSIÓN

3 Como es bien sabido, la aberración de la luz resulta del movimiento relativo del observador respecto a la fuente de luz observada. En el caso de una estrella, por ejemplo, la consecuencia principal es su aparente desplazamiento en la dirección del movimiento relativo. La aberración relativista que vamos analizaremos en esta sección también tiene que ver con el movimiento relativo de la fuente de

luz, aunque en este caso será la fuente de un rayo láser visible.

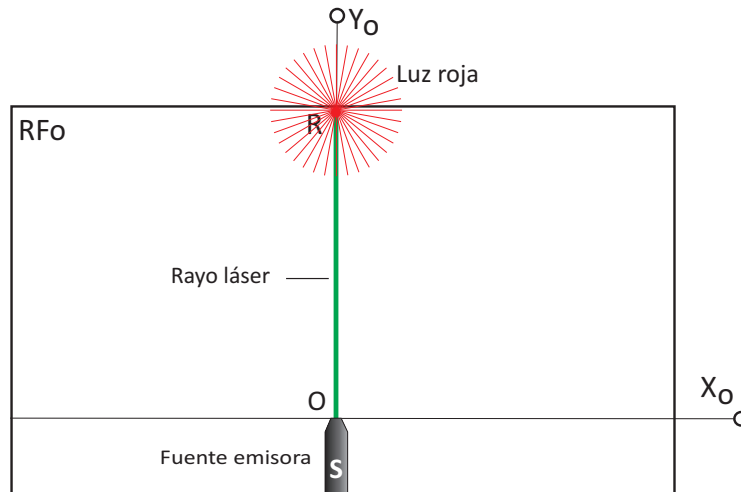


Figure 1.3: El rayo láser visible en el sistema de referencia propio de su fuente emisora S .

4 Sea RF_0 el laboratorio donde una fuente emisora de láser S emite un rayo láser vertical y visible cuya trayectoria coincide con el eje Y_0 de RF_0 , siendo su punto de partida el origen O de RF_0 . El rayo impacta en el punto R del techo del laboratorio donde un sensor de luz emite una luz roja cuando el láser lo activa (Figura 1.3). Siendo una discusión teórica, la fuente emisora del láser se supondrá lo suficientemente grande como para hacer posible las observaciones y mediciones relativistas implicadas en la discusión.

5 El punto de partida O del rayo láser y el punto R del techo del laboratorio donde está situado el sensor de luz son, por lo tanto, dos puntos fijos de RF_0 donde tienen lugar dos hechos concretos: la emisión de láser y la emisión de la luz roja.

6 Empezaremos probando que, de acuerdo con el segundo principio de la teoría especial de la relatividad, en el sistema de referencia RF_0 el rayo láser solo puede ser visto como un segmento de recta vertical

4 — Relatividad de un rayo láser visible

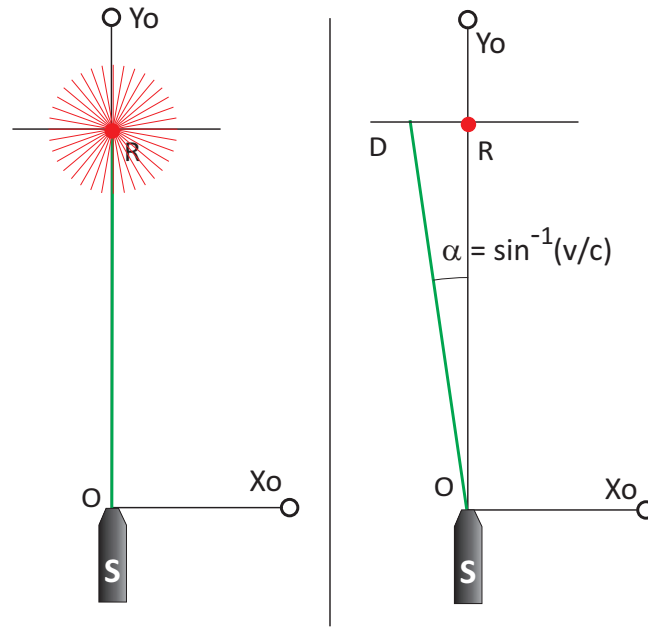


Figure 1.4: En RF_0 el rayo láser ha de seguir la trayectoria OR (izquierda), en caso contrario sería posible que los observadores de RF_0 calcularan la velocidad (absoluta) de su sistema de referencia propio (derecha).

cuyos extremos son los puntos O y R . En efecto, consideremos un fotón del rayo láser y supongamos que tras un tiempo t_0 desde su lanzamiento en el punto "O" el fotón impacta sobre un punto D distinto de R . Puesto que fue emitido en la dirección de O a R , el impacto sobre el punto D significa que durante el tiempo t_0 el laboratorio RF_0 se movió una distancia DR en la dirección de D a R . Por tanto la distancia DR se podría usar para calcular la velocidad u absoluta del laboratorio:

$$u = DR/t_0 \tag{1}$$

lo que va en contra de una bien conocida derivación del segundo principio de la teoría especial de la relatividad que establece la imposibilidad de sistemas de referencia absolutos con respecto a los

cuales pudieran determinarse velocidades absolutas. Por consiguiente, en RF_o el rayo láser solo puede ser visto como un segmento de recta vertical cuyos extremos son los puntos O y R .

7 Acabamos de probar que en el sistema de referencia RF_o el láser impacta sobre el punto R del techo del laboratorio y por tanto que el sensor de luz será activado y emitirá una luz roja. Este luz roja será visto por todos los observadores, estén o no en movimiento relativo con respecto al RF_o .

8 Es interesante destacar que lo mismo ocurriría si, en lugar de un fotón, la fuente S disparara una bala material en la misma dirección vertical. Así, desde el punto de vista de los observadores de RF_o los fotones del rayo láser se comportan como cualquier objeto material ligado mecánicamente al laboratorio, un asunto que ya discutimos en el capítulo anterior y que continuaremos en el siguiente.

9 Examinemos ahora el rayo láser desde la perspectiva de un sistema de referencia inercial RF_v desde el cual RF_o se mueve en la dirección de X_o , de izquierda a derecha con una velocidad v . Como en el resto del libro¹, asumiremos que el origen de los diagramas espaciotemporales de ambos sistemas de referencia coinciden en el instante 0 en el que el láser es disparado.

10 Desde la perspectiva del RF_v cada fotón del rayo láser comienza a moverse en punto O , donde es emitido por S , y termina en el punto R donde se activa el sensor de luz. Los puntos O y R , que mecánicamente están vinculados al laboratorio RF_o , están en una línea vertical en RF_o , por lo que en RF_v también han de estarlo. En efecto, supongamos que O y R , no son los extremos de una línea vertical en RF_v , estando el punto R desplazado, por ejemplo, a la derecha con respecto al punto O . Tendríamos que concluir que el movimiento relativo hace que el laboratorio aparezca deformado de tal manera que R es desplazado hacia la derecha con respecto a O .

11 Pero esa deformación sería incompatible con la transformación de Lorentz: puesto que los relojes en O y R están sincronizados tanto

¹Véase el Capítulo sobre convenciones.

6 — Relatividad de un rayo láser visible

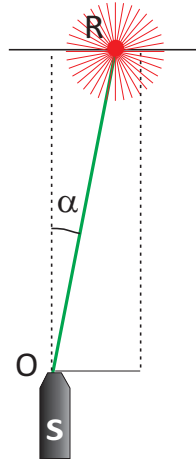


Figure 1.5: *O* y *R* debería ser visto verticalmente alineados en todos los sistemas de referencia que se muevan en la dirección de X_o porque la transformación de Lorentz no puede explicar $\alpha > 0$.

para los observadores de RF_o como como para los de RF_v ,² si (x_{oO}, t_o) , (x_{oR}, t_o) son las coordenadas espacio temporales de *O* y *R* en un instante cualquiera t_o de RF_o , las correspondientes coordenadas en el sistema RF_v serán:

$$x_{vO} = \gamma(x_{oO} + vt_o) \tag{2}$$

$$x_{vR} = \gamma(x_{oR} + vt_o) \tag{3}$$

Y puesto que $x_{oO} = x_{oR}$, tendremos:

$$x_{vR} - x_{vO} = \gamma((x_{oR} + vt_o) - (x_{oO} + vt_o)) = 0 \tag{4}$$

lo que significa que x_{vO} y x_{vR} están en una recta vertical paralela a Y_v . En consecuencia *OR* es una recta vertical en RF_v y por tanto el rayo láser ha de ser visto como una línea vertical en movimiento desde la perspectiva de este sistema de referencia.

²No hay separación entre ellos en la dirección del movimiento relativo

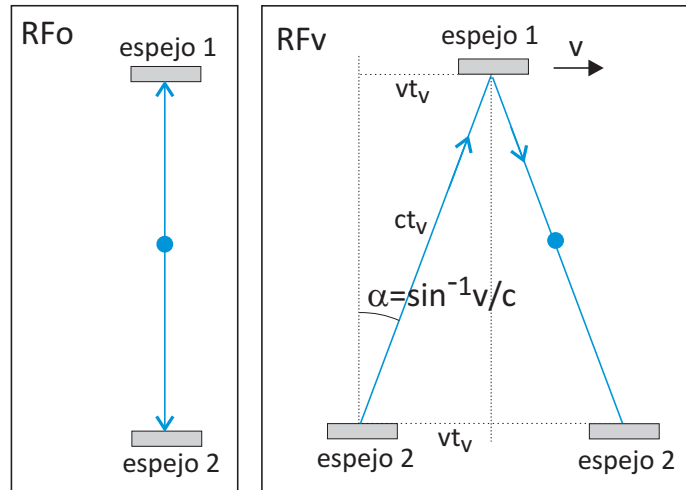


Figure 1.6: El ejemplo clásico de un fotón reflejado verticalmente por dos espejos horizontales en el sistema de referencia propio de los espejos (izquierda) y en un marco RF_v desde el que RF_o se mueve de izquierda a derecha (derecha).

12 Vamos a probar ahora que en RF_v es imposible ver el rayo láser como una línea vertical. Pero recordemos antes el ejemplo clásico de un fotón que se mueven verticalmente entre dos espejos reflectantes horizontales. En el sistema de referencia propio de los espejos, el fotón se mueve a través de trayectorias verticales, mientras que en otro sistema de referencia RF_v desde el que RF_o se mueve de izquierda a derecha en la dirección de X_o , los fotones se mueven a través de trayectorias inclinadas con respecto a la vertical un ángulo $\sin^{-1}v/c$ (Figura 1.6). Como sabemos (Capítulo ??) la dilatación del tiempo con el movimiento relativo se deriva de estas trayectorias diferentes.

13 Para los observadores de RF_v , los fotones de la cámara óptica que se liberan en el rayo láser no son los que se reflejan en la dirección perpendicular a los espejos, sino los que se reflejan en una dirección α tal que:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{vt_v}{ct_v} = \sin^{-1} \frac{v}{c} = \quad (5)$$

donde t_v es el tiempo que un fotón tarda en ir de un espejo al otro.

8 — Relatividad de un rayo láser visible

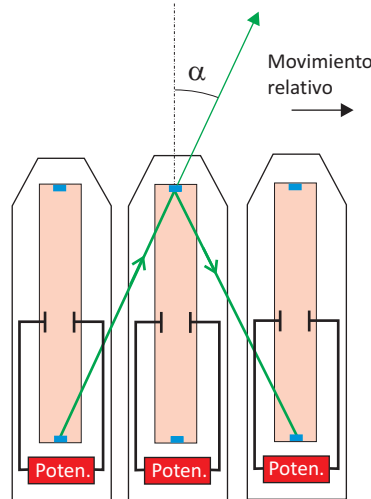


Figure 1.7: Reflexiones sucesivas de los fotones en la cavidad óptica de acuerdo con los observadores de RF_v .

En consecuencia, en RF_v el rayo láser es una línea inclinada de la vertical un ángulo $\sin^{-1} v/c$.

14 Ahora bien, si el rayo láser no es vertical en RF_v , entonces no puede hacer impacto en el punto R , de lo contrario los puntos O y R , no serían vistos alineados verticalmente, lo cual es imposible de acuerdo con 11. En consecuencia, y de acuerdo con los observadores de RF_v , el sensor de luz R no es activado y la luz roja no es emitida. Nótese que esta consecuencia (el sensor de luz no es activado) vale para todas las posibles trayectorias inclinadas del rayo láser.

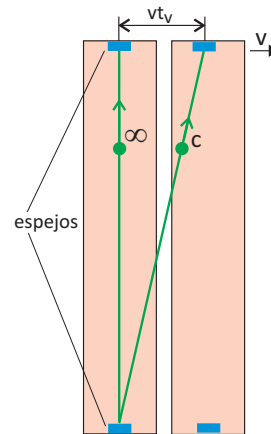


Figure 1.8: Visto desde RF_v , atravesar la distancia entre los dos espejos a través de una trayectoria perpendicular sólo es posible con una velocidad infinita.

CONCLUSIONES

15 Hemos llegado a una conclusión formalmente inconsistente, el sensor de luz del

punto R es y no es activado. Por lo tanto, al menos uno de los argumentos anteriores tiene que estar equivocado. Analicemos las correspondientes consecuencias de cada posibilidad.

16 Si el argumento erróneo es el de los observadores de RF_o , existirá un sistema de referencia con respecto al cual esos observadores podrán medir la velocidad de su propio sistema de referencia, lo que según el primer principio de la relatividad es imposible.

17 Si los observadores en RF_v están equivocados entonces los fotones liberados en el rayo láser solo pueden ser aquellos que se reflejan en la dirección perpendicular a los espejos (14). En consecuencia, y teniendo en cuenta que la velocidad relativa es mayor que cero y paralela a los espejos, esos fotones tendrían que moverse instantáneamente de un espejo al otro, o lo que es lo mismo con una velocidad infinita, lo que va en contra del segundo principio de la relatividad.

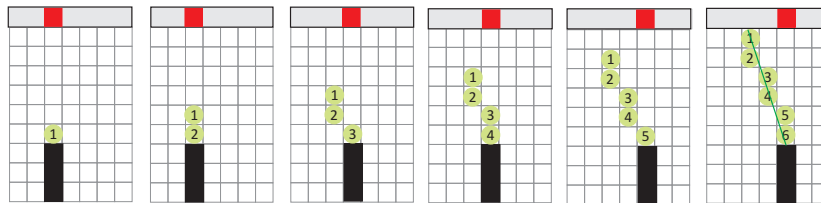


Figure 1.9: Una vez liberado, cada fotón tarda un tiempo mayor que cero en alcanzar el techo de RF_o . Durante ese tiempo, y desde el punto de vista de los observadores de RF_v , la fuente del láser se mueve hacia la derecha una distancia mayor que cero. En consecuencia, desde la perspectiva de RF_v , el rayo láser no puede ser X_o -vertical.

18 El problema detrás de la contradicción anterior³ es la imposibilidad de referir el movimiento de los fotones a un sistema de referencia independiente de RF_o y de RF_v , lo que a su vez es una consecuencia de la manera en la que el primer principio de la relatividad establece la universalidad de las leyes físicas: haciendo referencia a los sis-

³Desde RF_v el rayo ha de ser visto como una línea vertical en movimiento que no puede ser vertical.

10 — Relatividad de un rayo láser visible

temas de referencia.

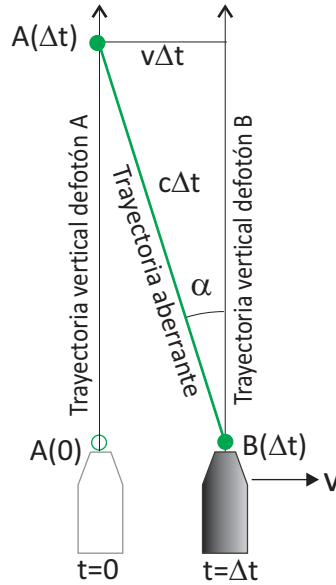


Figure 1.10: Trayectoria vertical de dos fotones A and B en dos instantes 0 y Δt , y trayectoria aberrante debida al movimiento de la fuente de luz.

19 Puesto que los puntos del continuum espacio-tiempo carecen de significado físico, el movimiento tiene que ser referido a sistemas de referencia arbitrarios. Esta servidumbre no existe en espacio-tiempos discretos, donde el movimiento se puede describir (al menos teóricamente) en términos de conjunto particulares de sítos que son el mismo en todos los sistemas de referencia.

20 En esas condiciones el movimiento de un fotón es independiente del movimiento relativo de su fuente emisora. Aunque el movimiento relativo de la fuente emisora puede originar una trayectoria aberrante (Figura 1.10).

Bibliography

- [1] Benjamín Alonso Hernández et al., *El láser. la luz de nuestro tiempo*, Centro de Láseres Pulsados Ultracortos Ultraintensos. Universidad de Salamanca, 2010.