

1.-La piedra de Galileo y el fotón de Einstein

[el experimento] mostrará que la piedra siempre cae en el mismo sitio, ya esté el barco en reposo o moviéndose con cualquier velocidad.

Galileo Galilei

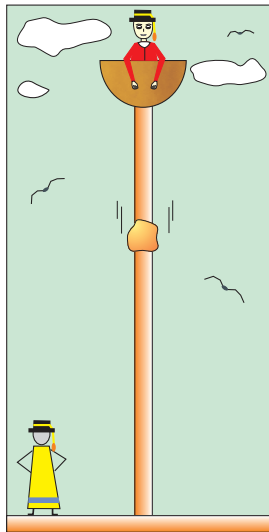


Figure 1.1: Para todos los observadores, la piedra se mueve paralelamente al mástil, esté o no el mástil en reposo con respecto al observador.

INTRODUCCIÓN

1 Como es bien sabido, una de las primeras discusiones sobre la relatividad del movimiento fue el llamado caso del mástil de Galileo. Una piedra cayendo desde lo alto del mástil de un barco en movimiento, ¿caerá o no en la base del mástil? Galileo se refiere a este experimento como realizado por otros pero no por él mismo, aunque estaba firmemente convencido de que la piedra caería en la base del mástil, como si el barco estuviera en reposo en un dique del puerto. [1].

2 Ahora sabemos las razones por las cuales la piedra caerá, en efecto, en la base del mástil, y las razones por las cuales los observadores del barco en movimiento verán que la piedra sigue una trayectoria vertical mientras que los observadores del puerto observarán que esa trayectoria no es vertical: todos los

2 — La piedra de Galileo y el fotón de Einstein

objetos del barco, incluyendo la tripulación y la piedra que cae, se mueven con la misma velocidad horizontal v y puesto que ninguna fuerza, aparte de la gravedad actúa sobre la piedra que cae, la piedra continuará moviéndose en la dirección horizontal con la misma velocidad horizontal v mientras cae (Primera ley de la mecánica de Newton).

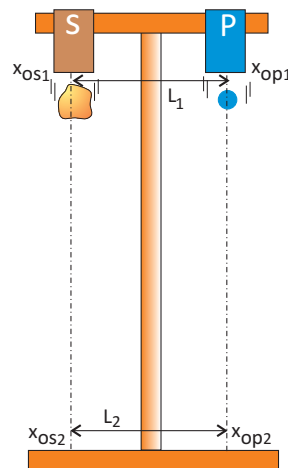


Figure 1.2: El mástil de Galileo y el fotón de Einstein ¿Se moverán paralelamente la piedra y el fotón?

3 Como sabemos, el movimiento de un fotón es independiente del movimiento de su fuente emisora. Contrariamente a la piedra de Galileo, el fotón no hereda el movimiento de su fuente emisora. ¿En estas condiciones, un fotón emitido desde el barco en la dirección paralela a su mástil ¿debe o no comportarse como la piedra caída? Esta es la pregunta que vamos a discutir aquí. Una discusión que nos servirá para preparar el debate del próximo capítulo.

DISCUSIÓN

4 Cambiemos ligeramente el escenario de la discusión de Galileo sobre la piedra que cae en el barco suponiendo que en el mismo

instante que la piedra (de Galileo) empieza a moverse hacia abajo se emite un fotón (el fotón de Einstein) hacia abajo en la dirección paralela al mástil del barco y a una cierta distancia horizontal de la piedra (Figura 1.2).

5 En la siguiente discusión examinaremos las trayectorias de la piedra de Galileo y del fotón de Einstein, desde lo alto del mástil donde son lanzados hasta los puntos de la cubierta del barco donde finalmente impactan. Como es usual el análisis se realizará desde dos puntos de vista diferentes, primero desde la perspectiva del barco (RF_o) y luego desde la del puerto (RF_v).

6 En lo que sigue consideraremos que el mástil es el eje Y_o de RF_o y su intersección con la cubierta del barco el origen de ese sistema de referencia. El análisis de la trayectoria de caída de la piedra es elemental: puesto que la única fuerza que actúa sobre la piedra es la fuerza de la gravedad, su trayectoria de caída solo puede ser una recta vertical paralela al mástil del barco.

7 De acuerdo con la interpretación analógica de la relatividad especial, la trayectoria del fotón también ha de ser una recta vertical paralela al mástil, en caso contrario la desviación α se podría utilizar para calcular la velocidad absoluta u de RF_o . En efecto, si y es la longitud del mástil, x el desplazamiento horizontal del fotón respecto de su posición inicial y t_o el tiempo empleado por el fotón en completar su viaje, tendríamos:

$$\tan \alpha = \frac{x}{y} \quad (1)$$

$$x = ut_o \quad (2)$$

$$u = y \tan \alpha / t_o \quad (3)$$

8 Para los observadores de la nave (RF_o) es el muelle (RF_v) (y el resto

4 — La piedra de Galileo y el fotón de Einstein

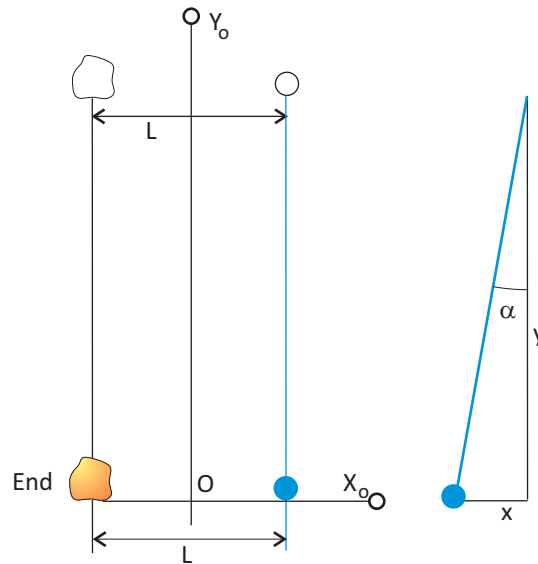


Figure 1.3: En RF_0 la piedra y el fotón siguen trayectorias paralelas (izquierda), en caso contrario sería posible medir la velocidad absoluta de RF_0 en términos de x (derecha).

del mundo) el que se mueve con respecto a ellos, y por esa razón relativista observan que la piedra y el fotón siguen trayectorias paralelas. Pero dejemos, solo por un momento, a estos observadores argumentar en términos no relativistas. Ellos saben que se mueven con respecto al muelle a una velocidad que ellos mismos cambian y controlan. Conocen también la razón por la que observan una trayectoria vertical en la caída de la piedra: como ellos mismos, la piedra hereda la velocidad de la nave y la mantiene mientras cae. Pero, de hecho, saben que son ellos los que se están moviendo con respecto al muelle. También saben la razón por la que observan que la piedra se mueve hacia abajo a lo largo de una trayectoria vertical: como ellos mismos, la piedra hereda la velocidad de la nave y la mantiene mientras cae. El fotón también sigue una trayectoria vertical, pero no hereda la velocidad de la nave. Entonces, podrían argumentar esos momentáneamente escépticos observadores, ¿por qué el fotón sigue

esa trayectoria? ¿Es la trayectoria de los fotones dependiente de su forma de razonar? Si el fotón no hereda el movimiento de la nave ¿por qué se observa como si heredara la velocidad de la nave?

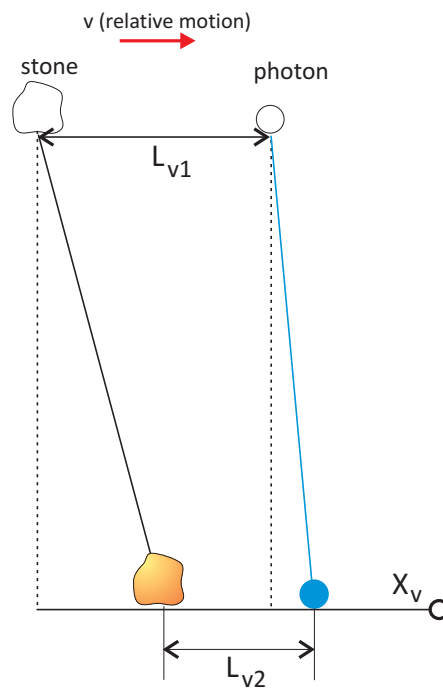


Figure 1.4: Desde la perspectiva del puerto (RF_v) las trayectorias de la piedra y del fotón no son paralelas.

9 Probaremos ahora que en RF_v las trayectorias de la piedra y del fotón no son paralelas. Supóngase que la piedra tarda un tiempo t_{vs} en alcanzar la cubierta del barco. Durante ese tiempo la piedra se moverá una distancia horizontal $d_{vs} = vt_{vs}$ en la dirección del movimiento relativo, donde v es la velocidad de ese movimiento relativo (la velocidad del barco visto desde el puerto).

10 Supóngase ahora que el fotón tarda un tiempo t_{vp} en alcanzar la cubierta del barco. Durante ese tiempo, y con respecto a RF_v , el barco se habrá movido una distancia horizontal $d_{vp} = vt_{vp}$ en la dirección del movimiento relativo. Puesto que la velocidad de la luz es mayor que

6 — La piedra de Galileo y el fotón de Einstein

la velocidad de la piedra tendremos:

$$t_{vs} > t_{vp} \quad (4)$$

Por tanto, para los observadores de RF_v , la piedra aterriza a una distancia horizontal vt_{vs} del punto desde donde fue dejada caer, mientras que el fotón impacta a una distancia horizontal vt_{vp} del punto desde donde fue emitido. Tendremos entonces:

$$vt_{vs} > vt_{vp} \quad (5)$$

11 En consecuencia, si L_{v1} y L_{v2} son respectivamente la separación inicial y la separación final entre la piedra y el fotón, desde la perspectiva de RF_v se verificará:

$$L_{v2} = L_{v1} - vt_{vs} + vt_{vp} \neq L_{v1} \quad (6)$$

puesto que el barco (RF_o) se mueve con relación al puerto (RF_v) en la dirección de la posición inicial de la piedra hacia la posición inicial del fotón (Figura 1.4). La desigualdad $L_{v1} \neq L_{v2}$ demuestra que las trayectorias de la piedra y del fotón no son paralelas en RF_v .

12 En consecuencia, y como en el caso de los observadores de RF_o , los observadores de RF_v verán que la piedra y los fotones se comportan de la misma manera con respecto al movimiento relativo: sus respectivas trayectorias varían con la velocidad relativa del barco: cuanto mayor sea su velocidad más inclinadas serán sus trayectorias.

13 Todos los observadores, estén o no en movimiento relativo con respecto al barco tendrán que concluir que, a pesar de que el movimiento de los fotones es independiente del movimiento relativo de su fuente, se comportan como cualquier objeto material mecánicamente vinculado a su sistema de referencia propio, y por tanto como un objeto que hereda el movimiento relativo de su sistema de referencia, como es el caso de la piedra de Galileo.

Bibliography

- [1] Galileo Galilei, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, Círculo de Lectores, Barcelona, 1997.