

## 1.-Michelson-Morley

Eppur si muove...  
Attributed to Galileo

### INTRODUCCIÓN

**1** La literatura científica hace uso de ciertas palabras clave, como 'nada' o 'vacío', cuyo significado es, cuando menos, confuso. Esta circunstancia añade dificultades innecesarias a algunas discusiones fundamentales. Decir que, por ejemplo, la energía del universo proviene de una fluctuación cuántica del vacío significa que el vacío es capaz de fluctuar, y entonces que no es nada sino algo con capacidad de fluctuar (siempre que la nada sea la nada y por lo tanto no pueda fluctuar).

**2** Este capítulo no está libre de algunas de esas palabras, aunque su objetivo no es aclarar su significado. Como es habitual en estos casos se hará uso de su significado intuitivo standard.

**3** Aparte de una discusión introductoria sobre el vacío y el éter luminífero que incluye el experimento de Michelson-Morley, aquí discutiremos sobre la independencia de la trayectoria de un fotón con respecto al movimiento relativo de su fuente emisora, así como de la hipotética existencia de un medio para la propagación de la luz.

2 — Michelson-Morley

¿ESPACIO VACÍO?

**4** El éter, el quinto elemento aristotélico fue inventado para evitar los problemas que planteaba el vacío.<sup>1</sup> Se suponía que rellenaba todo el universo, y naturalmente era el medio a través del cual se suponía que la luz se propagaba, una vez conocida su naturaleza electromagnética. En la siguiente sección examinaremos el experimento de Michelson-Morley que intentaba detectar el movimiento absoluto de la tierra a través del éter luminífero.

**5** Sabemos ahora que la luz se propaga a través del vacío y a través de diferentes medios materiales. Y también sabemos que su velocidad a través del vacío es una constante universal,  $c = 299792.458 \text{ Km / s}$ , derivada de otras dos constantes universales: la permeabilidad electromagnética ( $\mu_0$ ) y permitividad ( $\epsilon_0$ ) de vacío. Recuérdese que (Capítulo ??):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (1)$$

Así que el vacío o espacio vacío, de acuerdo con lo señalado en 1, tiene atributos físicos como la permeabilidad y la permitividad electromagnética.

**6** Estas razones, entre otras, sirvieron a Einstein para comprender que el espacio vacío no era la nada. Para él el espaciotiempo era de naturaleza absoluta aunque el espacio y el tiempo por separado eran siempre relativos.

**7** El vacío también puede fluctuar en el nivel cuántico. La energía oscura, por ejemplo, se supone que es una consecuencia de esas fluctuaciones, así como la creación y la aniquilación incesante de partículas cuánticas virtuales. Podría incluso estar relleno de diferentes tipos de condensados materiales [9]. La densidad masa-energía estimada del vacío es de  $2 \times 10^{-152} \text{ g/cm}^3$ .

**8** Los datos anteriores apuntan todos ellos en favor del sustantivismo en la controversia sustantivismo vs relacionismo. Sobre esa controversia véase por ejemplo [7]. Y para un resumen de las teorías

---

<sup>1</sup>Véanse por ejemplo [8], [3], [5], [9], [1].

históricas sobre el espacio véanse [4], [8], [6].

**9** Cuando decimos que la luz se propaga a través del vacío estamos diciendo que se propaga a través de una entidad física cuya naturaleza esencial es aún desconocida. Pero es una entidad física, no la nada.<sup>2</sup> Con la intención de evitar innecesarias discusiones confusiones y continuas explicaciones, de ahora en adelante esa entidad física será referida como el q-espacio. Desde la perspectiva de un CALM, el q-espacio sería la trama de sítos donde todos los objetos evolucionan.

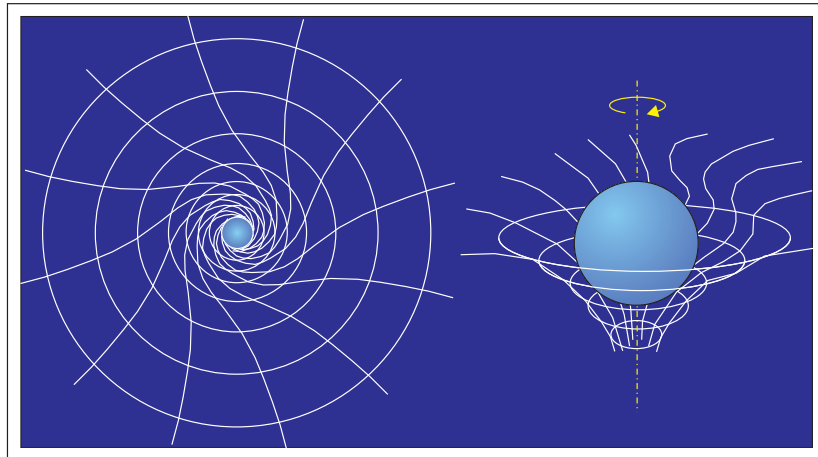


Figure 1.1: Arrastre del espaciotiempo por la rotación de un cuerpo masivo.

**10** Aunque no está directamente relacionada con el objetivo de este capítulo, la pregunta de cómo la materia ordinaria y el q-espacio interactúan entre sí, y particularmente la cuestión de cómo afecta a el q-espacio el movimiento en su seno de la materia ordinaria, se relaciona con el objetivo principal de este libro: la discusión sobre el paradigma analógico y el digital. Esa pregunta nos hace recordar las

<sup>2</sup>En la física contemporánea, es habitual referirse al movimiento de un cuerpo celeste con respecto a las estrellas fijas, al espacio inercial o al CMB (Cosmic Microwave Background)

4 — Michelson-Morley

discusiones clásicas sobre la interacción del éter lumínico y los cuerpos celestes y por tanto a los experimentos tipo Michelson-Morley.

**11** Un punto destacable sobre la interacción entre el q-espacio y los objetos materiales es el llamado *arrastré del sistema de referencia*, la posibilidad de que un objeto masivo en rotación como nuestra Tierra, arrastre y distorsione el espacio-tiempo. Se trata de una predicción de la teoría general de la relatividad que ha sido recientemente confirmada por el satélite Gravity Probe B [2]. Por lo tanto, podemos concluir confirmando que el q-espacio no es la nada sino una entidad física con un buen número de características físicas.

#### EXPERIMENTO MICHELSON-MORLEY

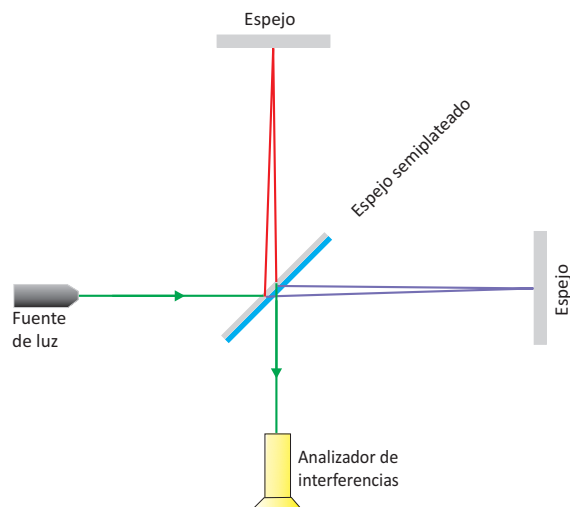


Figure 1.2: Diagrama esquemático del interferómetro de Michelson-Morley.

**12** Uno de los experimentos científicos mejor conocidos de la historia de la ciencia es el experimento de Michelson-Morley, llevado a cabo por primera vez en 1887 y repetido desde entonces en diferentes formas cerca de treinta veces, la última de ellas en 2010. El

objetivo del experimento original era detectar el viento o deriva del éter causado por el movimiento de la Tierra. O, para decirlo en otros términos, detectar el movimiento absoluto de la Tierra a través del hipotético éter lumínico. Básicamente, el aparato utilizado por Michelson y Morley era un interferómetro que analizaba la interferencia de dos rayos de luz que viajaban en direcciones ortogonales.

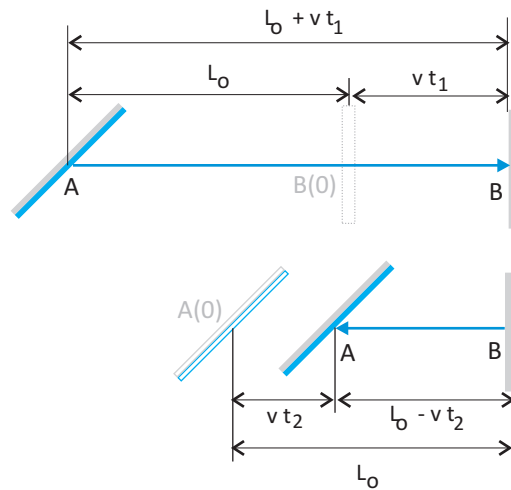


Figure 1.3: El viaje de la luz a lo largo del brazo horizontal.  $B(0)$  es la posición del espejo  $B$  cuando la luz abandona el espejo semiplateado  $A$ ;  $A(0)$  es la posición de  $A$  cuando la luz deja  $B$ .

**13** La Tierra se mueve alrededor del Sol a cerca de 30 Km/s, pero también se mueve con el sistema solar alrededor del centro de nuestra galaxia y nuestra galaxia se mueve alrededor del centro de su grupo de galaxias (Grupo Local) y el Grupo Local dentro de su supercúmulo (Supercúmulo Local, o Supercúmulo Virgo) y . . . No sabemos exactamente cómo se mueve la Tierra pero eso no será relevante para la siguiente discusión. Por lo tanto, y sin entrar en detalles, vamos a analizar el argumento del experimento de Michelson-Morley. Supongamos que uno de los brazos del aparato, cuya longitud propia es  $L_0$ , se mueve en la misma dirección que la Tierra, cuya velocidad es de

6 — Michelson-Morley

v. Supongamos que el rayo de luz que se mueve paralelamente a este brazo tarda un tiempo  $t_1$  en ir de  $A$  a  $B$  (Figura 1.3) y un tiempo de  $t_2$  en ir de  $B$  a  $A$ . Tendremos:

$$ct_1 = L_o + vt_1 \quad (2)$$

$$ct_2 = L_o - vt_2 \quad (3)$$

Por tanto:

$$t_1 = \frac{L_o}{c - v} \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{L_o}{c + v} \quad (5)$$

$$t_1 + t_2 = \frac{2cL_o}{c^2 - v^2} \quad (6)$$

$$= \frac{2L_o}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (7)$$

donde  $t_1 + t_2$  es el tiempo que la luz tarda en completar su viaje de  $A$  a  $B$  y de  $B$  a  $A$ .

**14** En el brazo ortogonal a la dirección de  $v$ , la luz viaja de  $A$  a  $E$  y de  $E$  a  $A$ , siendo  $AE$  y  $EA$  las hipotenusas de dos triángulos rectángulos iguales cuyos catetos son  $L_o$  y  $vt_3$ , donde  $t_3$  es el tiempo que la luz tarde en ir de  $A$  a  $E$ , así como de  $E$  a  $A$  (Figura ??). La ortogonalidad entre  $AE$  y  $AD$  y entre  $AE$  y  $DA$  hace inevitable el teorema clásico de Pitágoras clásico, y tendremos:

$$(ct_3)^2 = L_o^2 + (vt_3)^2 \quad (8)$$

$$t_3^2(c^2 - v^2) = L_o^2 \quad (9)$$

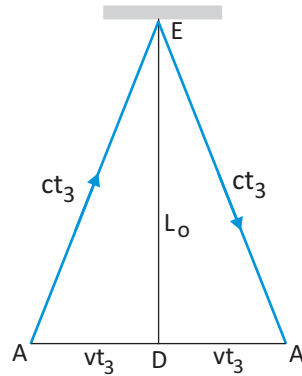


Figure 1.4: El movimiento de la luz a lo largo del brazo ARM.

$$2t_3 = \frac{2L_0}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (10)$$

$$= \frac{\frac{2L_0}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (11)$$

donde  $2t_3$  es el tiempo que tarda la luz en completar su viaje a lo largo del brazo vertical.

**15** Comparando (7) con (11) sacamos inmediatamente la conclusión de que el rayo que viaja a lo largo del brazo horizontal tarda mas tiempo en completar su viaje que el rayo que viaja a lo largo del brazo vertical:

$$\Delta t = (t_1 + t_2) - 2t_3 \quad (12)$$

$$= \frac{\frac{2L_0}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{\frac{2L_0}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (13)$$

8 — Michelson-Morley

$$= \frac{2L_o}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) > 0 \quad (14)$$

Siendo  $\Delta t$  detectable a partir de las interferencias entre ambos rayos ortogonales.

**16** Aunque  $\Delta t$  es experimentalmente detectable no fue detectada, y continúa sin serlo en términos significativos. Una pregunta, sin embargo, sigue abierta: ¿Es ese movimiento intrínsecamente no detectable o es esa ‘indetectabilidad’ una consecuencia de la forma en la que el q-espacio es modificado por el movimiento de la Tierra? Recuerdese el efecto arrastre del sistema de referencia. Volveremos a esta discusión experimental al final del capítulo.

¿HEREDAN LOS FOTONES EL MOVIMIENTO RELATIVO?

**17** Discutiremos ahora cómo se observa la trayectoria de un fotón desde diferentes sistemas de referencia inerciales. Asumiendo que la velocidad de un fotón es independiente de la velocidad con la que su fuente emisora es observada, llegaremos a un nuevo conflicto relativista que no parece tener solución bajo la hipótesis del continuo espacio-tiempo. Como veremos más adelante, ese conflicto replantea la cuestión sobre la posibilidad del movimiento absoluto, aunque ahora través de la textura discreta de un espacio compuesto de unidades mínimas indivisibles (sits).

**18** Sea  $RF_o$  un laboratorio donde una fuente cilíndrica  $S$  de fotones, colocada en el origen  $O$  de  $RF_o$ , emite un fotón en la dirección vertical de su eje principal (Figura 1.5). Sea  $E$  el punto del techo del laboratorio donde impacta el fotón. Ya hemos examinado esta situación (véase el capítulo ??) y sabemos la razón (relativista) por la que un observador en  $RF_o$  observará que el fotón sigue la trayectoria vertical de  $OE$ : si no fuera ese el caso existiría un sistema de referencia especial con respecto al cual se podría medir la velocidad absoluta de

¿Heredan los fotones el movimiento relativo? — 9

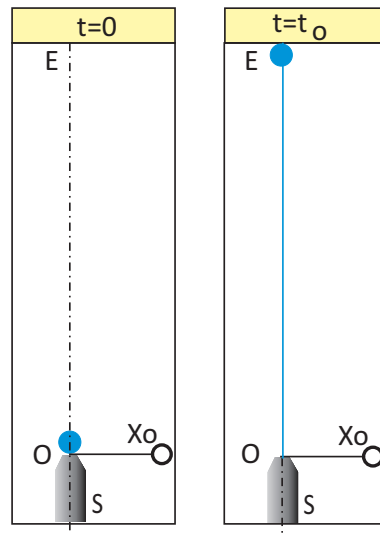


Figure 1.5: Trayectoria vertical  $OE$  de un fotón tal como se ve desde el sistema de referencia propio de su fuente emisora. El fotón se emite en el instante 0 (izquierda) y alcanza el punto  $E$  en el instante  $t_0$  (derecha).

$RF_0$ .

**19** Supongamos que  $RF_0$  es una nave espacial cuya velocidad constante respecto a un determinado cuerpo celeste  $B$  es intencionadamente cambiada a otra velocidad constante mediante una corta aceleración. Una vez alcanzada la nueva velocidad, los observadores de la nave seguirán viendo que  $B$  se mueve con respecto a ellos a la nueva velocidad... aunque ellos conocen las razones del cambio.

**20** Si en estas nuevas condiciones  $S$  emite un nuevo fotón en la misma dirección vertical  $OE$ , los observadores de la nave apreciarán que el fotón sigue la misma trayectoria vertical  $OE$ , como si el fotón también heredara el cambio en la velocidad relativa respecto a  $B$ . Al menos en este sentido, el fotón se comporta de la misma manera que cualquier objeto material mecánicamente ligado a la nave.

**21** Sean ahora  $RF_u$  y  $RF_v$  dos sistemas de referencia inerciales que se mueven con respecto a  $RF_0$  en la misma dirección  $X_0$ , aunque con

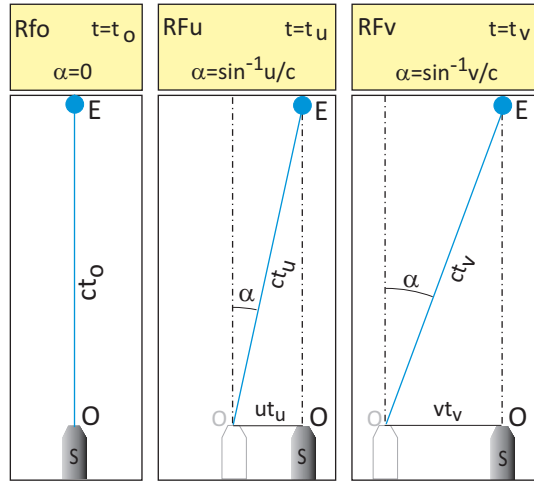


Figure 1.6: Trayectoria  $OE$  seguida por el desde el punto de vista de  $RF_o$ ,  $RF_u$  y  $RF_v$ .

diferentes velocidades  $u$  y  $v$ , respectivamente, siendo  $v$  mayor que  $u$ . Como de costumbre, supondremos que  $S$  emite el fotón en el instante  $t = 0$ , cuando coinciden los orígenes de los diagramas espacio-tiempo de los tres sistemas de referencia. Supongamos que el fotón tarda un tiempo  $t_o$  en atravesar la distancia vertical  $OE$  en  $RF_o$  mientras que en  $RF_u$  tarda un tiempo  $t_u$  y en  $RF_v$  un tiempo  $t_v$ . Tendremos:

$$\gamma_u = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \leq \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma_v \quad (15)$$

$$t_u = \gamma_u t_o < \gamma_v t_o = t_v \quad (16)$$

Por lo tanto, el desplazamiento del punto final  $E$  de la trayectoria con respecto al punto inicial  $O$  de la misma en  $RF_u$  es  $ut_u$ , mientras que en  $RF_v$  ese desplazamiento es  $vt_v$ , que obviamente es mayor que el primero.

**22** Nótese que en cada sistema de referencia  $RF_o$ ,  $RF_u$  y  $RF_v$  se ob-

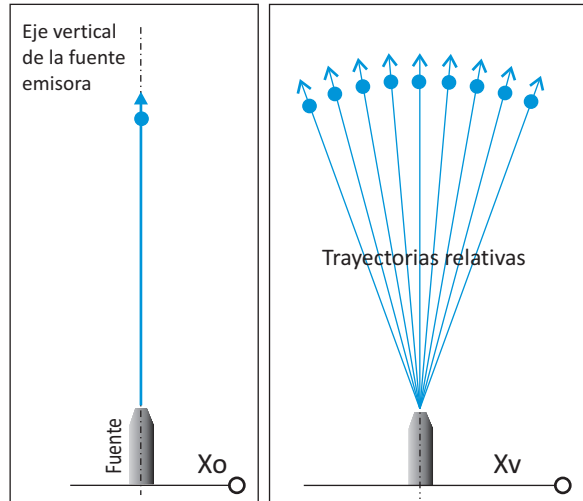


Figure 1.7: Trayectorias relativas de un fotón emitido verticalmente en el sistema de referencia propio de su fuente emisora vistas desde diferentes sistemas de referencia que se mueven respecto a la fuente emisora en una dirección perpendicular a su eje vertical (dirección de emisión).

serva una trayectoria diferente: vertical en  $RF_o$ , inclinada un ángulo  $\sin^{-1}u/c$  en  $RF_u$ , e inclinada un ángulo  $\sin^{-1}v/c$  en  $RF_v$ . Ahora bien, si el movimiento de un fotón es independiente del movimiento relativo de su fuente emisora ¿Cómo explicar que siga diferentes trayectorias dependiendo exclusivamente del movimiento relativo de su fuente?

**23** Solo el módulo de la velocidad (una magnitud escalar) del fotón es observada como independiente de cualquier sistema de referencia. Su velocidad (una magnitud vectorial) no se observa como independiente de la velocidad del movimiento relativo del sistema propio de referencia  $RF_o$  de su fuente. Tal como se ve desde cada sistema de referencia, el fotón hereda la componente horizontal de su velocidad del movimiento relativo de  $RF_o$  (véase la Figura 1.8):

$$c_x = \frac{vt_v}{t_v} = v \quad (17)$$

12 — Michelson-Morley

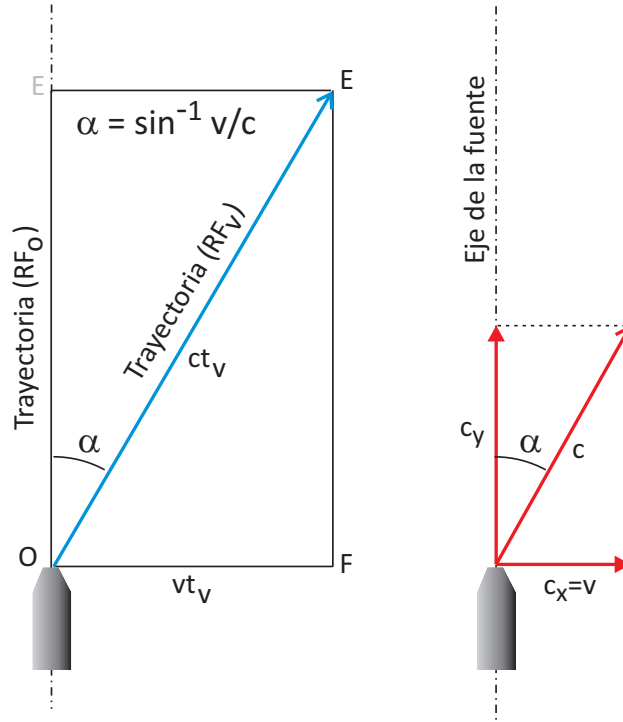


Figure 1.8: Los componentes vectoriales  $c_x$  y  $c_y$  de  $c$  desde el punto de vista de  $RF_v$ . Nótese que el ángulo  $\alpha$  depende de la velocidad relativa  $v$ .

$$c_y = \frac{ct_o}{t_v} = \frac{ct_o}{\gamma t_o} = \gamma^{-1} c \quad (18)$$

Y entonces

$$c = \sqrt{c_x^2 + c_y^2} \quad (19)$$

$$= \sqrt{v^2 + \gamma^{-2} c^2} \quad (20)$$

$$= \sqrt{v^2 + \frac{c^2 - v^2}{c^2} c^2} \quad (21)$$

¿Existe un medio para la propagación de la luz? — 13

$$= \sqrt{v^2 + c^2 - v^2} = c \quad (22)$$

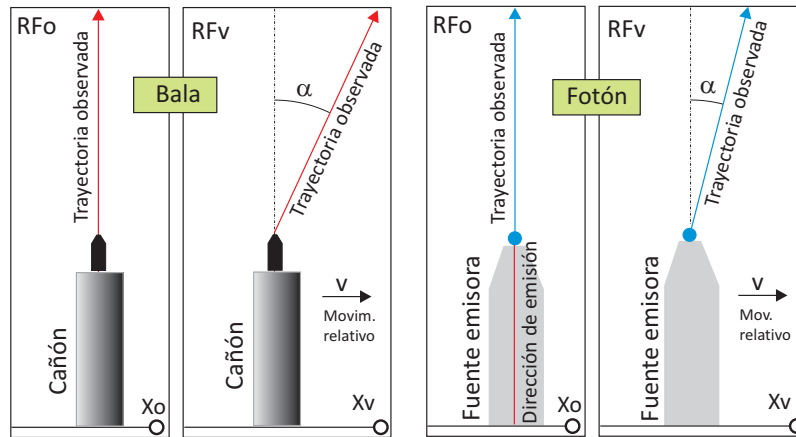


Figure 1.9: Como en el caso de la bala, la única manera de explicar  $\alpha$  es que el fotón herede la velocidad relativa  $v$  de su fuente emisora. Aunque hay una diferencia mecánicamente significativa entre la bala y el cañón, mientras que el primero es un objeto masivo mecánicamente ligado a su mecanismo de disparo, el segundo no lo es.

**24** El hecho de que, siendo independiente de la velocidad relativa de su fuente emisora, la velocidad de un fotón siempre herede la componente horizontal de la velocidad relativa de su fuente emisora como la componente horizontal de su propia velocidad, no parece ser una conclusión satisfactoria.

**25** Por otra parte, si la trayectoria de nuestro fotón fuera la misma para todos los observadores en  $R_o$ ,  $RF_u$ ,  $RF_v$  etc. no estaría el fotón moviéndose por una especie de medio absoluto? ¿Quizás el tejido de unidades indivisibles de un espacio cuántico?

¿EXISTE UN MEDIO PARA LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ?

**26** El éter, en sus numerosos variantes teóricas ha estado siempre presente en la historia de la física. Una de esas variantes fue el éter lumínico, el supuesto medio a través del cual la luz se propagaba.

Como es bien sabido, la teoría de la relatividad demostró que ese éter era innecesario. Pero, como también es sabido, la física cuántica y la física de partículas elementales lo hicieron renacer como un ave Fénix de sus cenizas. Aunque ahora no se trata del éter luminífero, sino de una aún no bien conocida entidad física de rebosante actividad cuántica, nuestro q-space.

**27** La luz se propaga a través de el q-espacio. Pero no sólo a través de el q-espacio, aunque con diferentes velocidades, también se propaga a través de la materia ordinaria (fluidos y sólidos cristalinos transparentes). Ahora bien, la materia ordinaria está compuesta de átomos, que están básicamente vacíos,<sup>3</sup> i.e. ocupados por el q-espacio. Aunque este q-espacio atómico está modificado por la presencia de las partículas subatómicas (y de sus campos de fuerza asociados) con las que la luz interacciona, parece razonable proponer que el q-espacio, modificado o no, es el medio por el que se propaga la luz.

**28** La materia ordinaria también se mueve a través del espacio físico, y lo hace libremente (primera ley de la mecánica). Esto significa que no es de esperar ninguna clase de 'viento' del movimiento de los cuerpos materiales a través de el q-espacio. Los superfluidos, como el éter lumínico relleno el espacio y la materia ordinaria no son necesarios. El q-espacio debería ser suficiente. El q-espacio podría ser la trama activa donde ocurren todos los fenómenos físicos.

**29** Ahora bien, si el q-espacio es distorsionado de alguna manera por el movimiento de los cuerpos masivos como la tierra, ¿afecta a su vez esta distorsión a la propagación de la luz a través del q-espacio que rodea a un cuerpo masivo? Si ese fuera el caso, ¿podría esa afectación explicar la imposibilidad de detectar el movimiento absoluto a través del q-espacio por medio de instrumentos basados en la luz? Quizás sólo experimentos realizados lejos de todos los objetos masivos podrían finalmente ser capaces de determinar si el movimiento absoluto es o no es detectable.

---

<sup>3</sup>99.999999999999 % del volumen atómico se supone que está vacío

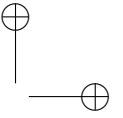
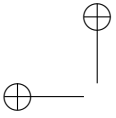
¿Existe un medio para la propagación de la luz? — 15

**30** En el modelo continuo de espacio-tiempo necesitamos un punto arbitrario, o conjunto de puntos, para describir el movimiento. Por esta razón, en el continuum espacio-tiempo sólo es posible el movimiento relativo, a menos que pudiéramos identificar en términos físicos cada punto del espacio físico, lo que es imposible porque los puntos son artefactos geométricos sin significado físico.

**31** Si el q-espacio fuera discreto y estuviera compuesto de unidades indivisibles cuánticas (como los sits de un CALM) cada una de esas unidades cuánticas tendría su propia identidad física. En esas condiciones, moverse a través de la trama de sits ¿sería movimiento absoluto o relativo? Esta cuestión reabre el debate sobre la posibilidad del movimiento absoluto y de su detección experimental desde la nueva perspectiva del paradigma discreto.

**32** Dicho esto, hemos de reconocer que lo ignoramos todo sobre ese asunto. Por ejemplo:

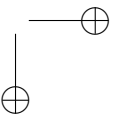
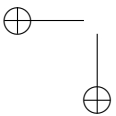
- ¿Sería posible detectar un sit, identificarlo, medir su estado?
- ¿Cómo fluctúa el estado de un sit?
- ¿Son los sits adyacentes unos a otro o existe algo entre ellos?
- ¿Tienen los sits formas definidas? ¿Son deformables?
- ¿El teorema de digital Pitágoras se verifica en la estructura de sits ?
- ¿Cuánto sits se ven afectadas por el movimiento de un simple fotón?
- ¿Y cuántos y de qué manera por el movimiento de un cuerpo masivo como la Tierra?
- ¿De qué manera esta alteración del q-espacio afecta a la propagación de la luz?
- ¿Es esa la causa de la indetectabilidad del movimiento absoluto de la tierra por medio de instrumentos basados en la luz?



16 — Michelson-Morley

- etc. etc.

Pero si el q-espacio es realmente discreto, estas y otras muchas preguntas relacionadas tendrán que ser planteadas tarde o temprano.



## Bibliography

- [1] Frank Close, *Nothing*, Oxford University Press, New York, 2009.
- [2] B.W. Parkinson J. P. Turneure J.W. Conklin M. I. Heifetz G.M. Keiser A. S. Silbergleit T. Holmes J. Kolodziejczak M. Al-Meshari J. C. Mester B. Muhlfelder V.G. Solomonik K. Stahl P.W. Worden Jr. W. Bencze S. Buchman B. Clarke A. Al-Jadaan H. Al-Jibreen J. Li J.A. Lipa J.M. Lockhart B. Al-Suwaidan M. Taber C.W. F. Everitt, D. B. DeBra and S. Wang, *Gravity probe b: Final results of a space experiment to test general relativity*, Physical Review Letters (2011), 201101–1 201101–5.
- [3] Henning Genz, *Nothingness. the science of empty space*, Perseus Publishing, Cambridge, MA, 1999.
- [4] F. Gómez Camacho, *Espacio y tiempo en la escuela de Salamanca*, Ediciones de la Universidad de Salamanca, 2004.
- [5] Brian Green, *The Fabric of the Cosmos. Space. Time. And the Texture of Reality*, Alfred A. Knopf, New York, 2004.
- [6] Nick Huggett, *Space from Zeno to Einstein*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2002.
- [7] Nick Huggett and Carl Hoefer, *Absolute and relational theories of space and motion*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Edward N. Zalta, ed.), Stanford Universtiy, fall 2009 ed., 2009.
- [8] Max Jammer, *Concepts of Space: The History of Theories of Space In Physics*, Dover Publlications Inc, New York, 1993.
- [9] Frank Wilczek, *The lightness of being. big questions, real answers.*, Allen Lane. Penguin Books., 2009.