

VIAJE HASTA LOS LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

be ahavá

RESUMEN:

En base al concepto de fase de una onda se hace una reflexión crítica de las principales ideas físicas aparecidas a principios del siglo XX: el principio de relatividad y la dualidad onda-partícula. También se analiza el papel de la física clásica planteando el problema de la mecánica de una partícula cargada y acelerada.

Índice

- 1.....INTRODUCCIÓN
- 2.....EL ESPACIO Y EL TIEMPO
- 3.....MECÁNICA DE UNA PARTÍCULA
- 4.....CONCLUSIONES
- 5.....APENDICE : *Una definición de tiempo físicamente razonable*

1-INTRODUCCION

A los 16 años Einstein se hizo la siguiente pregunta: Si un observador inercial de los que maneja la mecánica clásica es capaz de moverse a la velocidad, constante, de una onda electromagnética plana, ¿como percibiría los campos eléctrico y magnético?. La respuesta clásica es la que supone la onda electromagnética como una onda en la superficie de un estanque de agua: se percibirían unos campos estáticos, lo mismo que en el caso de la onda de agua se ve una forma que no oscila. Pero si las leyes físicas son las mismas para cualquier observador inercial (principio de relatividad) , resulta que las leyes de Maxwell no están de acuerdo con la visión clásica anterior. Por una parte, la existencia de campos independientes del tiempo necesitan del concurso de algún tipo de distribución de carga (leyes de Gauss y Ampère; $n-1$); pero no podemos recurrir a esto, ya que el hecho relevante es que las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío. Por otra parte, adoptando la hipótesis del vacío, el campo eléctrico de una onda electromagnética se debe a oscilaciones del campo magnético y viceversa . Esto es lo que exigen las leyes de Faraday y Ampere-Maxwell. Por tanto la luz que se propaga en el vacío consta de campos oscilantes para cualquier observador inercial.

¿Que es lo que falla en la visión clásica?. Por un lado aparecen ondas que se propagan sin la participación de un medio material; el vacío aparece como objeto físico. Por otro lado, si el observador no fuese capaz de moverse a la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío, entonces siempre percibiría campos oscilantes tal como requieren las leyes de Faraday y Ampère-Maxwell. Esto apunta a una solución no clásica del problema, pues supone la existencia de un límite al movimiento de cualquier objeto físico, y este límite es la “velocidad” de la luz en el vacío.

Esta imagen nos hace ver la importancia de considerar el comportamiento de los diferentes tipos de ondas que se dan en la naturaleza en función del *movimiento relativo* del observador. Este estudio se puede hacer desde el concepto de fase.

Los fenómenos de interferencia y difracción son lugares comunes en varias ramas de la física. Los experimentos que incluyen estos fenómenos se cuentan entre los que producen las medidas mas exactas. La fase aparece directamente en las leyes que determinan los patrones de interferencia para cualquier onda plana. Por tanto, considerando el principio de relatividad, la forma de estas leyes se puede mantener para observadores inerciales en movimiento relativo uniforme si se supone que la fase de cualquier onda plana es invariante. Este carácter de la fase se tomará aquí como un principio, y por tanto solo queda justificado por las consecuencias que produce, las cuales serán el hilo conductor de este trabajo. Los principios básicos que se utilizarán son:

1-Principio de Relatividad Restringido o definición de Sistema de Coordenadas Inercial: Las leyes físicas son las mismas para cualquier observador que utilice un sistema de coordenadas inercial (observador inercial).

2-Existencia de los Sistemas Inerciales de Coordenadas: A todo cuerpo físico se puede asociar un observador inercial. En general suponemos que se puede

hablar del sistema de coordenadas inercial *instantáneo* asociado a un objeto físico cualquiera en el instante dt , de modo que en este instante su velocidad relativa al objeto en cuestión es nula. (n-2)

3-Límite de la “velocidad” de la luz

3.1-La “velocidad” de la luz en el vacío es una constante física.

3.2-No se puede transferir *información* entre un foco y un receptor a velocidad superlumínica.

4-Dualidad Onda-Partícula: Cualquier partícula libre tiene una onda cuántica plana asociada.

5-La fase de cualquier onda plana: $\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r} - \omega \Delta t$, es invariante entre observadores inerciales.

2-EL ESPACIO Y EL TIEMPO

Resulta difícil definir conceptos tan básicos, de hecho algunos filósofos los consideran ideas “a priori” del entendimiento. En física es mejor fijarnos en lo que hacemos con ellos. Utilizamos el espacio y el tiempo como coordenadas para limitar las acciones de la naturaleza y así poder establecer un orden y compararlas. Entre otros conceptos que dependen de este orden está la idea de *causalidad*, asociada a nuestro sentido físico.

Desde Galileo la física clásica siempre asumió la relatividad del espacio: un objeto puede ocupar un lugar fijo para un observador y para otro ocupar varios lugares sucesivamente. Pero si nos dicen que el tiempo es relativo, es decir, que las acciones físicas en un experimento no tienen por que tener el mismo orden temporal para todos los observadores; parece que se abren las puertas del *Caos*, de la falta de causalidad. La idea tradicional de tiempo conlleva esta impresión; pero un examen mas profundo elimina la imagen de caos arbitrario y restablece la idea de *Universo* en física mediante el principio de relatividad[1]. El descubrimiento del carácter relativo del tiempo se basa en el análisis de sucesos simultáneos.

Supongamos este escenario: dos sistemas de referencia cartesianos paralelos en desplazamiento relativo uniforme sobre la dirección común que se considera eje “x”. Distinguiremos los dos observadores por el sentido de la velocidad relativa vista por cada observador, es decir, uno será el observador “+” y otro será el observador “-“. La velocidad relativa correspondiente será v_+ y v_- .

Sea ahora una regla situada a lo largo del eje x. en reposo para este observador. Desde el punto medio (x_0) de la regla se genera una señal electromagnética esférica que llega a los dos extremos de la regla: x_1 y x_2 ($x_1 < x_2$). Dado que la velocidad de propagación es la misma en los dos sentidos (la “velocidad” de la luz en el vacío c), si se producen sendas acciones cuando la luz llega a los extremos de la regla, estas aparecen al mismo tiempo: son simultáneas para el observador “-“. Pero visto por el observador “+“, resulta que el efecto conjunto de la velocidad relativa y la constancia de la “velocidad” de la luz provoca un cambio en el orden de las acciones anteriores: la parte de la señal que se mueve en contra de la velocidad relativa recorre menos espacio hasta el extremo correspondiente que la parte de la señal que se mueve en el mismo sentido que la velocidad relativa. Si, según el ppio 3.1, la señal recorre

esos espacios con la misma “velocidad” c , tenemos que las acciones generadas en los extremos no son simultáneas para “+”:

$$(x_{0+} - x_{1+}) - v_+ t_{1+} = ct_{1+}; \quad (x_{2+} - x_{0+}) + v_+ t_{2+} = ct_{2+}; \Rightarrow \quad t_{2+} - t_{1+} = \frac{(x_{2+} - x_{1+})v_+}{c^2 - v_+^2}$$

Donde se ha supuesto que, para el observador “+”, el pulso se emite también, en un instante determinado, desde el centro de la regla móvil (**n-3**). Esta ecuación da el orden temporal de las acciones mencionadas.

Si ahora intercambiamos los papeles y la regla está en reposo para el observador “+”, manteniendo su dirección y sentido sobre el eje común, el resultado para el observador “-“es el mismo, salvo el signo de la velocidad relativa que cambia, es decir, el orden temporal de las acciones se invierte:

$$t_{2-} - t_{1-} = \frac{(x_{2-} - x_{1-})v_-}{c^2 - v_-^2} \quad (1.1)$$

La constancia de la “velocidad” de la luz y la idea tradicional (Newtoniana) de tiempo no son compatibles. En su famoso trabajo de 1905[1], Einstein propone redefinir el concepto de tiempo a partir del tiempo local: el tiempo que marca un reloj en reposo. Postulando la constancia de la “velocidad” de la luz en el vacío define lo que es *sincronizar* relojes en reposo espacialmente separados; la sincronización así definida es una relación de *equivalencia* entre todos los relojes en reposo relativo a un sistema de coordenadas inercial determinado, y por tanto se puede utilizar para *definir* un tiempo físico común para cada punto de un sistema de coordenadas cartesiano inercial. Para aclarar esta idea y justificar por que aparece el término *velocidad* entre comillas referido a la luz en el vacío vea el apéndice.

Propiedades del espacio y el tiempo: Linealidad, Relatividad y Simetría.

Debemos encontrar alguna regla que nos permita relacionar los espacios y los tiempos de *una* acción física que miden dos observadores en movimiento relativo. Solo así los observadores pueden creer que están experimentando los mismos, o distintos, fenómenos, y por tanto llegar a leyes comunes.

¿Cómo es esta regla?: Intentaré seguir el criterio de mayor sencillez posible.

Una acción física (A) está limitada, al menos, por dos *sucesos*: dos conjuntos de coordenadas \mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} , \mathbf{t} . En lo tocante a nuestro objetivo, esta acción se puede descomponer en dos (A_l , A_s), introduciendo un tercer suceso que sea simultáneo con el suceso final y local con el suceso inicial (**n-4**). La relación mas sencilla de los tiempos y espacios de estas acciones es la *lineal*:

$$t(A) = t(A_l) + t(A_s); \quad e(A) = e(A_l) + e(A_s) \quad (e = x, y, z) \quad (1.2)$$

Donde A_l es una acción local: los sucesos limitantes ocurren en un mismo punto; y A_s es una acción simultánea: los sucesos limitantes ocurren a la vez. Para el observador que verifique la simultaneidad de A_s será $t(A_s) = 0$, pero para cualquier otro en movimiento relativo este término no se anula, como se ha visto antes. Esto representa la *relatividad* del tiempo. Para el observador que verifique la localidad de A_l , será $e(A_l)=0$, pero para cualquier otro

observador en movimiento relativo, la acción A_i cambia de posición y este término no se anula. Esto representa la relatividad del espacio. Estos términos, $t(A_s)$ y $e(A_i)$, tienen una propiedad de *asimetría* directamente relacionada con el movimiento relativo. La forma más sencilla para esta propiedad es la siguiente: Si el observador “+” mide el espacio de una acción que sea local para el observador “-”, obtendrá un valor “e”. Si se intercambian los papeles y es ahora el observador “-” quien mide el espacio de la misma acción, ahora local para el observador “+”, obtendrá un valor “-e” (Transformación de Galileo). Si el observador “+” mide el tiempo de una acción que sea simultánea para el observador “-”, obtendrá un valor “t”. Si se intercambian los papeles y es ahora el observador “-” quien mide el tiempo de la misma acción, ahora simultánea para el observador “+”, obtendrá un valor “-t”. Esta condición de asimetría supone, en la experiencia de la regla del apartado anterior (1.1), que

$$v_- = -v_+$$

Y que la longitud de la regla móvil: $x_2 - x_1$, no depende de la dirección de su velocidad relativa al observador. Esta asimetría en el tiempo supone también que las acciones simultáneas no pueden estar relacionadas causalmente ya que no existe un orden objetivo para ellas. Si suponemos que las leyes físicas son causales, es decir, que representan un orden temporal objetivo de las acciones físicas, entonces estas leyes no deben depender de la existencia de acciones simultáneas (n-5).

Quedan otras dos componentes del espacio y el tiempo por analizar: el tiempo local $t(A_i)$ y el espacio simultáneo $e(A_s)$. Las propiedades de estas magnitudes parecen ser notoriamente diferentes. La longitud de una regla, es decir, el espacio simultáneo, no puede anularse para ningún observador inercial. La marcha de un reloj, es decir, el tiempo local, tampoco puede detenerse por efecto de la velocidad relativa. Note el lector la importancia de estos conceptos, pues se relacionan directamente con la forma física en que medimos el espacio y el tiempo. Estas componentes no deben participar del carácter asimétrico de las componentes anteriores. Las conclusiones que siguen toman como hipótesis el carácter *simétrico* de estas componentes.

Transformación del tiempo local

La condición de simetría es la siguiente:

(a) Si el observador “+” mide el tiempo Δt^l de una acción local, el observador “-” medirá un tiempo Δt .

(b) Si se cambian los papeles y el observador “-” mide el tiempo de la misma acción local, que evidentemente debe ser también Δt^l ; entonces el observador “+” medirá un tiempo Δt .

Suponemos ahora que en nuestro sistema se mueve una onda plana a la “velocidad” de la luz en la dirección creciente del eje “x” común a los dos sistemas de referencia. Si aplicamos la simetría del tiempo local al principio de fase invariante tenemos:

$$-w_+ \Delta t^l = k_- v_- \Delta t - w_- \Delta t \quad (a)$$

$$-w_- \Delta t^l = k_+ v_+ \Delta t - w_+ \Delta t \quad (b)$$

Dividiendo (a) por w_- y (b) por w_+ , multiplicando las ecuaciones y dado que

$w = ck$ para ambos observadores (ppio 3.1), tenemos lo siguiente:

$$\Delta t = \Delta t' \beta^{-1}; \quad \frac{w_-}{w_+} = \frac{k_-}{k_+} = \sqrt{\frac{1 - \frac{v_+}{c}}{1 - \frac{v_-}{c}}}; \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1.3)$$

Transformación del espacio simultáneo

La condición de simetría es la siguiente (se consideran solo sucesos sobre el eje x):

(c) Si el observador “+” mide el espacio Δx^s de una acción simultánea, el observador “-“ medirá un espacio Δx .

(d) Si se cambian los papeles y el observador “-“ mide el espacio de la misma acción simultánea, que evidentemente debe ser también Δx^s ; entonces el observador “+“ medirá un espacio Δx . Aplicando esto en nuestro caso:

$$k_+ \Delta x^s = k_- \Delta x - w_- \Delta t_- \quad (c)$$

$$k_- \Delta x^s = k_+ \Delta x - w_+ \Delta t_+ \quad (d)$$

Nos damos cuenta de que los intervalos de tiempo que aparecen están asociados al mismo suceso simultáneo visto por observadores con movimiento relativo $+v$ y $-v$, por tanto, como se vio antes estos tiempos tienen signos contrarios. Por tanto, si dividimos la primera ecuación por k_- , la segunda por k_+ y sumamos las ecuaciones tenemos, utilizando la relación de vectores de onda de 1.3:

$$\Delta x = \Delta x^s \beta^{-1} \quad (1.4)$$

Contracción de Lorentz: relación entre espacios simultáneos (reglas en reposo y en movimiento)

Sea ahora otra acción intermedia definida por ser local al sistema “-“, sus límites temporales son simultáneos, según el criterio del observador “+“, con los sucesos de la acción que este observador desea medir y los sucesos iniciales de las dos acciones coinciden espacialmente también. El valor Δx de 1.4 se puede descomponer en el sistema “+“, aplicando la linealidad del espacio (1.2), así:

$$\Delta x_+ = \Delta x_+^s + v_+ \Delta t_+ \quad (1.2')$$

Es decir, consta de un espacio simultáneo y el desplazamiento relativo de la acción intermedia local. Para el caso descrito por 1.4 el desplazamiento relativo depende del incremento de tiempo por pérdida de simultaneidad. Este incremento se ha calculado anteriormente en 1.1:

$$\Delta t_+ = \Delta x_+^s \frac{v_+}{c^2} \beta^{-2} \quad (1.1) \quad \text{Y por tanto de 1.2'} \quad \Delta x = \Delta x_+^s \beta^{-2}$$

Igualando esto a la transformación del espacio simultáneo (1.4) tenemos la contracción de Lorentz

$$\Delta x_+^s = \Delta x_-^s \beta \quad (1.5)$$

La longitud de una regla móvil es menor que la misma regla en reposo.

Transformación completa de la coordenada tiempo

Sustituyendo la ecuación 1.5 en la ecuación del tiempo simultáneo 1.1 y sumando con los resultados del tiempo local, como requiere 1.2, tenemos la transformación completa del tiempo:

$$\Delta t_+ = (\Delta t_- - \frac{v_-}{c^2} \Delta x_-^s) \beta^{-1} \quad (1.6)$$

Transformación completa de la coordenada x

Partiendo de (1.2') y sustituyendo la transformación completa del tiempo (1.6) y la contracción de Lorentz (1.5) tenemos

$$\Delta x_+ = (\Delta x_- - v_- \Delta t_-^l) \beta^{-1} \quad (1.7)$$

Relación entre tiempos locales (relojes en reposo y en movimiento)

Supongamos un reloj cualquiera en reposo para el observador "+". La medida de este reloj representa evidentemente un tiempo local para "+": t_+^l .

Para "-" tenemos el reloj de "+" en movimiento; según (1.7), será: $\Delta x_-^s - v_- \Delta t_-^l = 0$; donde Δt_-^l es el tiempo local en "-"; por tanto, según la definición de tiempo, medido por un reloj cualquiera en reposo para "-". Si suponemos el mismo origen inicial de tiempos para "+" y para "-" (de nuevo según la definición de tiempo), obtenemos de (1.6) que la medida del tiempo en "+" y la medida del tiempo en "-" cumplen:

$$t_+^l = t_-^l \beta \quad (1.6')$$

Por tanto, un reloj en movimiento (t_+^l) *atrás* *progresivamente* respecto de uno en reposo (t_-^l). No es posible para un observador inercial sincronizar relojes en reposo con relojes en movimiento, y por tanto, la definición de tiempo (ver apéndice) no se puede ampliar para incluir a más de un sistema inercial.

Transformación completa de las coordenadas y, z

Puesto que estas coordenadas vectoriales son perpendiculares a la velocidad relativa, las componentes simétricas y asimétricas de sucesos sobre estas coordenadas son como si la velocidad relativa se anula:

$$\Delta y_+ = \Delta y_-^s; \quad \Delta z_+ = \Delta z_-^s; \quad (1.8)$$

Cinemática elemental: ¿qué se mueve?

Hasta ahora hemos determinado los conceptos de espacio y tiempo, pero ¿qué debemos entender por *movimiento*?. Este concepto es de radical importancia. Todo movimiento supone una relación entre intervalos de posición e intervalos de tiempo. Las relaciones más sencillas que pueden establecerse son:

$$\vec{\Delta r}_-^s = \Delta t_-^l \vec{A}_- \quad (1.A) \quad \Delta t_-^l = \vec{B}_- \cdot \vec{\Delta r}_-^s \quad (1.B)$$

Siendo los vectores A y B constantes. Aplicando las ecuaciones 1.6, 1.7 y 1.8 a 1.A tenemos

$$\Delta x_+ = \frac{A_{x-} - v_-}{1 - \frac{v_- A_{x-}}{c^2}} \Delta t_+ ; \quad \Delta y_+ = \frac{\beta A_{y-}}{1 - \frac{v_- A_{x-}}{c^2}} \Delta t_+ ; \quad \Delta z_+ = \frac{\beta A_{z-}}{1 - \frac{v_- A_{x-}}{c^2}} \Delta t_+ ; \quad (1.9)$$

El resultado 1.9 es la misma ley 1.A vista por el observador “+” y determina las componentes de la velocidad para este observador. Si hacemos lo mismo con 1.B, comprobaremos que esta ley se mantiene invariante si B se transforma como A/c^2 . De este modo la cinemática elemental consta de dos leyes

$$\vec{\Delta r}_A = \vec{V} \Delta t_A \quad (1.A) \quad \Delta t_B = \frac{\vec{V}}{c^2} \cdot \vec{\Delta r}_B \quad (1.B)$$

Evidentemente 1.A representa el desplazamiento de una partícula a velocidad constante, siendo el vector V su velocidad. El resultado 1.B se presenta intencionadamente como un movimiento dependiente de 1.A; llamemos a la relación 1.B *covelocidad*. El sistema 1.A-1.B recuerda a un paquete de ondas cuyas componentes se desplazan a la “velocidad” de la luz: 1.A se refiere al grupo de ondas y 1.B a la fase. Para algunos autores la covelocidad se asocia con un giro, vibración o acción interna a la partícula[7] ($\mathbf{n-0}$). Evidentemente ambas expresiones son incompatibles y se refieren a movimientos independientes. El lector comprobará que una *dualidad* similar al conjunto 1.A, 1.B aparece insistentemente en la exposición.

Transformaciones de frecuencia y vector de onda

Aplicando las transformaciones 1.6, 1.7 y 1.8 (transformaciones de Lorentz) al invariante de fase para una onda plana cualquiera que se propaga en una dirección dada se obtiene, considerando que cada magnitud del conjunto (Δx , Δy , Δz , Δt) pueden tomar cualquier valor independientemente del resto:

$$w_+ = (w_- - v_- k_{x-}) \beta^{-1}; \quad k_{x+} = (k_{x-} - \frac{v_-}{c^2} w_-) \beta^{-1}; \quad k_{y+} = k_{y-}; \quad k_{z+} = k_{z-}; \quad (1.10)$$

Para apreciar el significado físico de estas ecuaciones clasificaré las ondas planas en tres casos según su comportamiento respecto al *movimiento* relativo:

I- Existe un observador inercial que no es capaz de medir la oscilación de la onda con un reloj en reposo: $w_- = 0$. Haciendo esta sustitución en 1.10 vemos que la frecuencia de la onda es un término *asimétrico*, dependiente de la velocidad relativa en módulo y dirección. La longitud de onda es un término *simétrico*, de modo que tiene un significado físico objetivo: se trata de una distancia real, un espacio simultáneo. Se puede demostrar que la ley de composición de velocidades 1.9 es válida para estas ondas y por tanto, ya que existe un observador para el que la velocidad de estas ondas se anula, nunca superan la “velocidad” de la luz. Como consecuencia siempre podemos encontrar en principio un *foco* para estas ondas. El movimiento de este foco se puede modular y por tanto el observador puede utilizar estas ondas para transmitir información. Por su naturaleza estas ondas *no* admiten condiciones de contorno temporales, y sabemos que admiten condiciones de contorno espaciales, como espejos por ejemplo. Llamemos a este caso *onda espacial*.

Ejemplos de ondas espaciales: ondas transversales como las ondas en la superficie del agua, pulsos en una cuerda tensa, ondas electromagnéticas en líneas de transmisión. Un sólido rígido (como límite una partícula) o cualquier cosa capaz de mantener una forma definida independiente del tiempo puede considerarse como combinación de ondas espaciales. No parece aventurado decir que estas ondas necesitan un medio material de propagación.

II- Existe un observador inercial que no es capaz de medir la longitud de onda con una regla en reposo: $k_{\perp} = 0$. En este caso el vector de onda tiene un comportamiento *asimétrico* y la frecuencia se transforma de forma *simétrica*, de modo que es ahora la frecuencia la que tiene un significado físico objetivo: se trata de un tiempo local, del periodo de una vibración real. La “velocidad” de estas ondas es siempre por encima de la “velocidad” de la luz, por tanto, según el principio 2.2, *no es posible encontrar un foco emisor real para ellas* ni, en general, una referencia inercial para su movimiento. En rigor esto no supone que estas ondas no transmitan información, sino que el observador, al no encontrar un foco, no puede codificar información en ellas. En este punto del discurso podemos decir que el movimiento de estas ondas se corresponde con una covelocidad. Por otra parte según el *principio de Huygens* para las ondas del caso I, la llegada de una señal a un receptor supone la creación de un foco secundario de reemisión. Esto no es posible en este caso: el *receptor* no puede ser foco secundario; lo cual significa que estas ondas, manteniendo el principio de Huygens, se propagan en el vacío (como puede hacer la luz). Por su naturaleza estas ondas *no* admiten condiciones de contorno espaciales: son continuas en el espacio. El aparente sentido único del tiempo no hace probable la existencia de condiciones de contorno en forma de espejos temporales, en los que estas ondas se reflejen hacia su pasado. La única forma de considerar la existencia física de estas ondas es que actúen sobre receptores. Si el principio de Huygens no es aplicable a los receptores, entonces estos no admiten ni reflexión ni refracción, y por tanto estas ondas ceden toda su energía e impulso (colapso) al tiempo que llegan al primer receptor que encuentren. Así vemos que existen *condiciones de contorno temporales* para ellas. Llamemos a este caso *onda temporal*, aunque por sus propiedades de continuidad espacial y colapso bien puede llamarse onda cuántica. En lo que sigue voy a suponer que estas ondas son las que maneja la mecánica cuántica.

III- No existen observadores inerciales para los que se anulen ni la frecuencia ni el vector de onda. La frecuencia y el vector de onda tienen significado físico objetivo. Llamemos al caso *onda espacio-temporal*. Ejemplos de ondas espacio-temporales son las ondas longitudinales, como el sonido, y también el caso transversal de la luz en el vacío. Note el lector que el sonido presenta una fenomenología cuántica por medio de los *fonones* y la luz por medio de los *fotones*. Por tanto hay que pensar que estas ondas heredan las propiedades de los casos anteriores y son una asociación de onda espacial y onda temporal. Esto supone que son posibles casos de ondas sonoras y electromagnéticas (y partículas, como veremos) cuyo origen no es posible determinar físicamente. Honestamente, creo que estas son consecuencias lógicas de los principios adoptados (**n-6**).

Un *paquete de ondas espacio-temporales* en el vacío cuyas componentes se mueven a la “velocidad” de la luz tiene dos componentes: la onda de grupo que se mueve a velocidad inferior a la luz y la onda de fase que se mueve a velocidad superior a la luz. Por tanto un paquete de este tipo de alguna forma se desdobra en una asociación de dos componentes: onda espacial y onda temporal. Las relaciones 1-A y 1-B hacen pensar que el objeto físico a que se hace referencia es mas similar a un paquete de ondas que a una partícula. Lo fundamental de todo esto es que el objeto representado es una asociación de una onda espacial que se mueve a cierta velocidad y una onda temporal que se mueve con la covelocidad correspondiente.

3-MECANICA DE UNA PARTÍCULA

La dualidad onda-partícula es un hecho demostrado en experimentos de interferencia y difracción. Se han realizado experiencias con diferentes *partículas*, como electrones, neutrones e incluso moléculas complejas. En todas se han encontrado patrones de interferencia asociadas a la fase de una onda. La Energía y el Impulso mecánico de las partículas están, según De Broglie, relacionados mediante de la constante de Planck con la frecuencia y el vector de ondas de la onda asociada:

$$E = \hbar\omega; \quad \vec{P} = \hbar\vec{k}$$

Dado que el impulso mecánico de una partícula depende linealmente de su velocidad, para el observador que percibe la partícula en reposo el vector de onda se anula y, por tanto, se trata de una onda temporal del apartado anterior. De 1.10 obtenemos inmediatamente

$$E_+ = (E_- - v_- P_{x-})\beta^{-1}; \quad P_{x+} = (P_{x-} - \frac{v_-}{c^2} E_-)\beta^{-1}; \quad P_{y+} = P_{y-}; \quad P_{z+} = P_{z-}; \quad (2.0)$$

Estas relaciones son las mismas que en relatividad se introducen para una partícula(onda espacial). En suma, vemos que podemos considera a la partícula como una *asociación* de onda espacial y onda temporal, y por tanto se puede incluir en el caso III junto con la luz y el sonido. Investiguemos ahora las interacciones que puede tener una partícula según estas ecuaciones. Buscamos expresiones invariantes entre sistemas inerciales que relacionen modificaciones de Energía y modificaciones de Impulso. Las mas sencillas, siguiendo el esquema dual ya utilizado, son las siguientes:

$$dE_+ = \vec{a}_+ \cdot d\vec{P}_+ \quad (2.a) \quad d\vec{P}_+ = dE_+ \vec{b}_+ \quad (2.b)$$

La aplicación de las transformaciones de energía/impulso 2.0 al caso de la ecuación 2.a da

$$dE_- = \frac{a_{x+} - v_+}{1 - \frac{a_{x+}v_+}{c^2}} dP_{-x} + \frac{\beta a_{y+}}{1 - \frac{a_{x+}v_+}{c^2}} dP_{y-} + \frac{\beta a_{z+}}{1 - \frac{a_{x+}v_+}{c^2}} dP_{z-}$$

Es decir: **a** se transforma como una velocidad (1.9).

La aplicación de las transformaciones de energía/impulso a la ecuación (2.b) da

$$dP_{x-} = \frac{b_{x+} - \frac{v_+}{c}}{1 - b_{x+}v_+} dE_-; \quad dP_{y-} = \frac{\beta b_{y+}}{1 - b_{x+}v_+} dE_-; \quad dP_{z-} = \frac{\beta b_{z+}}{1 - b_{x+}v_+} dE_-$$

Es decir, **b** se transforma como una covelocidad.

Recordando los conceptos básicos de la mecánica: El impulso mecánico, la masa (como relación entre el impulso y la velocidad de la partícula) y la energía cinética, podemos identificar lo siguiente:

Para 2.a el factor invariante **a** es la velocidad de la partícula: **V**. La ecuación es la definición de *energía cinética* de una partícula de masa constante. Se trata por tanto de una acción *acelerativa* sobre la partícula:

$$dE_a = \vec{V} \cdot d\vec{P}_a \quad (2.1)$$

Para 2.b el factor invariante **b** es la covelocidad de la partícula: **V/c²**. Considerando la *equivalencia masa-energía*, la ecuación expresa una variación de impulso de la partícula por alteración de su masa.

$$\frac{dE_b}{c^2} \vec{V} = d\vec{P}_b \quad (2.2)$$

Ambas ecuaciones, 2.1 y 2.2, son incompatibles, y se refieren a acciones *independientes*. En un caso general, cuando la partícula experimente los dos tipos de interacción tenemos, haciendo la multiplicación escalar de 2.2 por **V** y sumando con 2.1

$$dE \neq \vec{V} \cdot d\vec{P} \quad \equiv \quad dE \neq \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (2.3)$$

Donde **dP** y **dE** son, respectivamente, la suma de los cambios de impulso y energía de 2.1 y de 2.2. Evidentemente la desigualdad 2.3 se debe enteramente a 2.2.

Se plantea la mecánica de una partícula cargada y acelerada

El comportamiento de una carga eléctrica acelerada, con independencia de la fuerza aceleradora, es un problema límite de la física clásica. La radiación de un sistema de cargas es un hecho descrito en el teorema de Poynting; consecuencia lógica de las ecuaciones de Maxwell. El punto clave es la interpretación del vector de Poynting (**S=ExH**), que aparece en este teorema, como flujo de energía en base al principio de conservación de la energía de un sistema electromagnético. Desde esta perspectiva se puede pensar que la radiación, como la energía potencial, es un comportamiento asociado al sistema de cargas, no a las cargas individuales. En este sentido se habla en los textos de *radiación dipolar, cuadripolar...*[3].

Sin embargo en la teoría clásica se ve inmediatamente que la radiación de un sistema de cargas se puede calcular si se conoce el movimiento de dichas cargas, ya que esto es suficiente para determinar los campos que aparecen en el vector de Pointing. Hay una relación directa entre el movimiento del sistema de cargas y la radiación. H.A. Lorentz fue mas allá y amplió el resultado para una carga aislada que resulte ser acelerada de cualquier modo, independientemente de la existencia de una energía potencial. Demostró que el campo en las proximidades de una carga con simetría esférica resulta distorsionado por los efectos conjuntos de la aceleración de dicha carga y la velocidad de propagación finita de las alteraciones del campo[5]. Esta distorsión genera una “*auto-fuerza*” neta del campo sobre la partícula, sobre su propia fuente, tal que el desplazamiento de esta fuerza puede representar, al menos en ciertos casos, la energía electromagnética radiada. De este modo Lorentz no atribuye la radiación a la aceleración relativa entre las cargas del sistema, tal como sería de esperar si hubiese relación con la energía potencial, sino a la *aceleración de una carga respecto de cualquier sistema de coordenadas inercial*. En cuanto a la conservación de la energía, la energía de radiación se extrae *directamente* de la energía mecánica de la partícula cargada, no directamente de la energía potencial del sistema electromagnético. Este será el punto de vista de partida para el planteamiento del problema. Abraham y Lorentz dan una forma teórica para la fuerza de auto-frenado, sin embargo aquí solamente se supondrá su existencia y las propiedades que esta fuerza debería tener respecto de la radiación.

En lo que sigue se distinguirá y se tratará de relacionar los conceptos de partícula (mecánica) y carga puntual (electromagnetismo). Como modelo electromagnético de la partícula se toma el de una carga puntual, con algún matiz adicional que se introducirá mas adelante. Una carga puntual acelerada emite energía e impulso en forma de radiación. La razón de esta atribución es que la energía dE_r emitida al campo de radiación en un instante dt , se puede seguir hacia atrás en el tiempo hasta una acción ocurrida en el punto que ocupaba la carga en un tiempo pasado. Esta acción es un cambio en la velocidad del punto cargado, y por tanto *en la partícula* se experimenta el efecto del aumento de energía dE_r .

Otra propiedad de la radiación emitida es que, para un observador inercial en reposo instantáneo respecto del punto cargado (ppio 2), la radiación se emite de forma simétrica respecto de dicho punto, de forma que el impulso total emitido por la radiación (dPr) se anula [3, 4]. Si hacemos que la velocidad v_{-} entre dos sistemas inerciales de coordenadas coincida con la velocidad V_{-} de la partícula en el instante dt_{-} entonces en el instante correspondiente dt_{+} la partícula está en reposo para el observador “+”, y por tanto para el impulso de radiación instantáneo será $dPr_{+x} = 0$. Esto conduce según 2.0 a la ecuación 2.2 (y por tanto a 2.3) para la relación entre energía e impulso de la radiación. Es decir, la radiación supone, inicialmente, un aumento de la energía interna de la partícula.

Analicemos la dinámica del sistema según la conservación de la energía-impulso. La energía-impulso transferida por la fuerza externa a la partícula se invierte en:

A-Modificación de la energía-impulso del campo de la carga puntual.

B-Modificación de la energía-impulso de la partícula.

En cuanto a la modificación del campo, los resultados teóricos [4] indican la existencia de dos campos

A.1-Un campo casi-estacionario, igual que el campo de una carga puntual que se mueve a velocidad constante, pero que depende de la velocidad retardada. Las líneas de este campo pasan por el punto cargado.

A.2-Un campo de radiación, independiente del anterior. Las líneas de este campo no pasan por el punto cargado.

Por tanto la modificación de energía-impulso del campo tiene dos componentes: la modificación de energía-impulso del campo casi-estacionario y la modificación de energía-impulso del campo de radiación.

El concepto de *masa electromagnética*, como señala Feynman [5], no está explicado coherentemente en electromagnetismo clásico, aunque existe evidencia experimental. En este punto voy a suponer que la modificación de energía e impulso del campo casi-estacionario de la carga puntual se puede representar considerando que la masa de la partícula contiene una parte que es de origen electromagnético.

Si se supone, siguiendo la mecánica de Newton, que la fuerza exterior, cuyo punto de aplicación suponemos está en el punto cargado, solamente ejerce un *efecto acelerativo* según 2.1, y sin considerar energía potencial:

$$dE_{ext} = \vec{V} \cdot d\vec{P}_{ext} \Rightarrow dE_p + dE_r = \vec{V} \cdot d\vec{P}_p + \vec{V} \cdot d\vec{P}_r$$

Donde el subíndice “ext” indica la interacción con la fuerza externa, el “p” se refiere a la partícula, el “r” a la radiación y V es la velocidad del punto cargado. De esta ecuación se deduce que, como los términos asociados a la radiación verifican la desigualdad (2.3), los términos asociados a la partícula también tienen que verificarla, es decir, hay que suponer una *acción adicional* de modificación de energía interna de la partícula:

$$dE_p^{(2.1)} + dE_p^{(2.2)} + dE_r = \vec{V} \cdot d\vec{P}_p^{(2.1)} + \frac{V^2}{c^2} dE_p^{(2.2)} + \frac{V^2}{c^2} dE_r \quad (2.4)$$

Donde los superíndices de las energías hacen referencia a los casos descritos por las ecuaciones 2.1 y 2.2 . Note que se ha supuesto que la velocidad del punto cargado es igual que la velocidad de la partícula.

Se ve inmediatamente que la ecuación anterior requiere que

$$dE_p^{(2.2)} = -dE_r \quad (2.5)$$

Es decir, siempre que haya radiación, hay una disminución de la energía interna de la partícula. Esta disminución cancela, *exacta y simultáneamente*, el aumento de energía interna de la partícula debida a la radiación de la carga puntual. De este modo la energía interna de la partícula, y por tanto la masa, es un parámetro *constante*. Note el lector que, si hubiésemos supuesto que la

modificación de energía por radiación no se debe contar entre las formas de interacción de la partícula, la ecuación 2.5 se interpretaría como una pérdida progresiva de energía interna de la partícula, situación que no se considera aceptable físicamente. Note también que, como ya se ha dicho, el principio de relatividad hace problemático que las leyes físicas dependan de la existencia de acciones simultáneas debido a la relatividad de la simultaneidad. Siguiendo con el razonamiento, las ecuaciones del movimiento de la partícula son las conocidas de mecánica clásica:

$$F_{ext} \cdot dr = dE_p^{(2.1)} \quad F_{ext} dt = dP_p^{(2.1)} \quad (2.6)$$

La radiación no aparece por ningún lado y parece violarse la *conservación de la energía*. En realidad la experiencia indica que, asociado a la radiación, hay un efecto de *frenado* sobre la partícula. La forma habitual (y clásica) de representar este hecho con las ecuaciones 2.6 es introducir una fuerza adicional de *auto-frenado* cuyo origen está en el campo propio de la partícula acelerada. Esta fuerza es la que se ha mencionado antes; calculada teóricamente por Abraham y Lorentz. Por tanto, los términos de la izquierda de las ecuaciones 2.6 constan en realidad de dos partes: la fuerza externa y la fuerza de auto-frenado. Los términos de la derecha corresponden a la modificación de energía cinética e impulso de una partícula de masa constante.

Resumiendo la situación, tenemos los siguientes *supuestos*:

- 1-La masa electromagnética resume las modificaciones de energía-impulso del campo de la partícula.
- 2-La velocidad del punto cargado y de la partícula es la misma.
- 3-La fuerza neta tiene un efecto exclusivamente acelerativo sobre la partícula.
- 4-Se deduce que el aumento de energía interna de la partícula asociado a la radiación se compensa simultáneamente con un término de disminución de energía interna de la partícula: la masa es constante.
- 5-Existe una fuerza de auto-frenado entre la partícula y su campo.

El planteamiento intuitivo de la fuerza de auto-frenado \vec{F}_{af} es que, para cumplir con la conservación de la energía, el efecto energético de esta fuerza es restar a la partícula una energía cinética equivalente a la de radiación, y de este modo provocar su frenado. De la misma forma, la fuerza de auto-frenado debe contemplar la *conservación del impulso*:

$$\vec{F}_{af} \cdot d\vec{r} = -dE_r ; \quad \vec{F}_{af} \cdot dt = -d\vec{P}_r \quad (2.7)$$

Es inmediato comprobar que estas relaciones son *incompatibles*, dado que los términos de radiación cumplen 2.2 y la fuerza de auto-frenado cumple 2.1. En mi opinión se pueden dar dos interpretaciones:

- 1-La “fuerza” de auto-frenado no puede tener un efecto exclusivamente acelerativo, sino que afecta, de alguna forma, a la masa de la partícula. De hecho, la interpretación lógica de 2.7 en el contexto de este trabajo es que la fuerza de auto-frenado es responsable de eliminar el exceso de energía interna de la partícula asociada a la radiación.

2-La radiación no se extrae totalmente del movimiento de la carga, sino que también hay que considerar, de algún modo, la energía potencial del sistema electromagnético. Es decir, la radiación es un comportamiento de los *sistemas* afectados por fuerzas electromagnéticas(n-7).

Sin embargo notemos que la ecuación 2.3 tiende a ser una igualdad en el límite de la “velocidad” de la luz de forma que las interacciones de la partícula tienden al comportamiento acelerativo descrito en 2.1. Por tanto *al menos en el límite* se puede mantener la ley de la fuerza de auto-frenado según 2.7 junto con el resto de los argumentos utilizados. ¿Hay algo más allá de este límite...?.

Desde el Límite

La fuerza de Lorentz : $\mathbf{F}=q(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})$, introduce la masa mecánica en el conjunto de las ecuaciones de Maxwell; en particular introduce la energía cinética en el teorema de Poynting. El éxito *conjunto* de la mecánica y del electromagnetismo clásico depende de la posibilidad de reducir los problemas al comportamiento de algún tipo de partículas incondicionalmente estables, es decir, su masa es un parámetro constante. H.A Lorentz hizo este planteamiento para su teoría del electrón. Esta condición hace que estas teorías sean sistemas cerrados, circulares, auto-consistentes. Los problemas se enfocan en relacionar el movimiento de las partículas con fuerzas y campos y al revés. En la mecánica de Newton sabemos que si hay una fuerza sobre una partícula esta se acelera y que si se acelera entonces está sometida a una fuerza. La fuerza de auto-frenado se puede introducir utilizando esta lógica clásica, pero esto conduce a plantear el “subproblema” de la estructura y estabilidad interna de las partículas cargadas [5].

Sin embargo, el problema de la estabilidad no es totalmente extraño al electromagnetismo. La ley de Lenz dice que las corrientes asociadas a fuerzas electromotrices inducidas en un conductor por alteración del flujo magnético externo, generan campos magnéticos que, a su vez, tienden a cancelar las alteraciones del flujo magnético externo. Este comportamiento se puede incluir dentro del principio de Le Châtelier [6]. Según este principio, si un sistema en equilibrio estable es sometido a *tensión* entonces reaccionará para *compensar* esa tensión. Por otro lado, la emisión de radiación de una partícula real es discontinua en el tiempo. Por tanto no resulta difícil imaginar una capacidad de acumular energía interna para la partícula. Esta capacidad de “entrar en tensión” es la otra cara de la moneda de la fuerza de auto-frenado. Esta fuerza es necesaria para compensar tensiones internas en las partículas relacionadas con la emisión de radiación. Si la estabilidad de algunas partículas, como pueda ser el electrón, tiene una base electromagnética, entonces solo se necesita la acción de este campo; tensión y compensación deben ser fases de un mismo proceso: la acción del campo electromagnético sobre la partícula. Como se vio, según el principio de relatividad es conveniente que las acciones de tensión-compensación no sean simultáneas. Intentemos una explicación que considere estas acciones como parte de un proceso de tensión-compensación que afecta a la partícula. El carácter del tiempo asociado a este proceso puede deducirse de las conclusiones a que hemos llegado. Las ecuaciones 2.7 son válidas en el límite de altas velocidades y por tanto los supuestos 1-5 son correctos al menos en este límite. En particular según el

supuesto 4 el proceso de tensión-compensación es instantáneo, no tiene duración. Por tanto, como condición cinemática, la duración de dicho proceso disminuye a medida que la velocidad de la partícula tiende a la “velocidad” de la luz. Esto indica que esta duración, aunque está asociada a una acción local a la partícula, no se transforma como el tiempo local de 1.3. En cambio es mas adecuado asociar el proceso con la frecuencia de alguna onda temporal. Esta posibilidad apunta a la existencia de una conexión o acoplo entre la onda cuántica y el campo electromagnético, de modo que hay un flujo de energía asociado a la radiación (y a la fluctuación de la masa) entre estos objetos.

Si la onda cuántica temporal tiene que ver con la radiación entonces la onda espacial tiene que ver con el efecto acelerativo de las fuerzas. Esta idea de dualidad subyace a toda la exposición. Si la onda cuántica es un objeto con entidad física, entonces debemos aceptar que es capaz de absorber o ceder energía. Pero si esta onda se modifica para absorber o ceder el aumento de energía interna de la partícula, entonces habríamos encontrado un foco para modularla, lo cual no es posible por principio. Para explicar esto acudo a las relaciones de Heisenberg y considero que existen unos límites para la modulación de la onda cuántica acotados por la expresión $\Delta E \Delta T \approx h$. Esta expresión define una condición de contorno temporal. Si una onda colapsa y cede una energía ΔE , entonces el tiempo de su modulación ha sido ΔT . De alguna forma llega un momento en que se borra toda memoria. Si un observador quisiera modular la onda cuántica de un electrón, debería realizar al menos una interacción mínima (fotón) con la partícula. Pero esto ya supone el colapso de dicha onda, dado que la energía transferida y el tiempo empleado son compatibles con las condiciones de contorno de la onda cuántica. El resultado del colapso es un cambio de la onda cuántica. Según la mecánica cuántica, sobre este cambio de *estado* solo es posible conocer una cierta distribución de probabilidad; lo cual supone que el observador de dicha onda no puede identificarla como procedente de un origen o foco determinado(n-8). De este modo, el observador sigue sin poder modular la onda cuántica (aun cuando encuentre un foco), y por tanto no puede transferir información a velocidad superlumínica. Note el lector que el principio de constancia de la “velocidad” de la luz en el vacío, tal como se define en el apéndice, implica la posibilidad de identificar señales luminosas; de poder decir que la señal luminosa en $A(x_a, y_a, z_a, t_a)$ es la misma que ahora llega a $B(x_b, y_b, z_b, t_b)$. Aunque la velocidad de la luz en el vacío es independiente del foco que la genera, la luz tiene un origen reconocible. Identificamos la luz a partir de su procedencia y la consideramos como símbolo representativo del mismo objeto que la emite. En nuestra vida diaria siempre suponemos esta asociación, aunque a veces la asociación esté errada. Esta es una idea profunda de la que dependen nuestra creencia en un mundo externo no subjetivo, así como muchas técnicas científicas: telecomunicaciones, espectroscopia, teledetección, radioastronomía... Sin embargo, a nivel cuántico *por principio* no se puede distinguir un fotón de otro. Esta partícula no tiene la identidad individual que se ha supuesto para las señales luminosas. La detección de la señal luminosa supone la detección de fotones; por tanto debe ser posible asociar fotones individuales a señales (ondas) luminosas para que el principio de constancia de la velocidad de la luz tenga sentido físico. La dualidad dice que fotones y señales luminosas no son independientes.

4-CONCLUSIONES

El desarrollo del principio de relatividad y de la dualidad onda-partícula conduce a un cambio radical de nuestras ideas de espacio, tiempo, movimiento, materia y vacío. Mientras que las ideas clásicas de espacio, tiempo y movimiento subsisten a bajas velocidades, la idea clásica de partícula cambia radicalmente: la materia ya no se compone de puntos con masa y carga. La representación más elemental de la materia es una pareja de ondas, espacial y temporal, con propiedades muy diferentes pero que permanecen asociadas formando las *componentes* de una unidad más profunda. La onda espacial necesita un espacio simultáneo pero no tiene limitaciones temporales; lo más sencillo es pensar que se trate de las dimensiones de lo que llamamos partícula; por tanto al hablar de partícula nos estamos refiriendo solo a una de las componentes. La onda temporal necesita un tiempo local, una vibración, pero no tiene limitaciones espaciales. El comportamiento de la materia en un caso concreto depende de la existencia o no de receptores u otras causas que provoquen el colapso de la onda cuántica(n-9). Esta asociación fundamental de ondas depende de una pieza clave: la *inercia* o masa de la partícula. La radiación está asociada a incrementos de masa y a la onda temporal; la modificación de energía cinética está asociada al valor absoluto de la masa y a la onda espacial. En los dos casos hay un efecto inercial, bien de oposición a la aceleración (3ª Ley de Newton de acción-reacción) o de oposición a la radiación (auto-frenado de Abraham-Lorentz). Es debido al carácter clave de la masa que las ecuaciones 2.0 se pueden derivar tanto de planteamientos relativos a la onda cuántica como relativos a la partícula. Por otra parte aparece un nuevo objeto de estudio en física: el vacío; con la capacidad de propagar ondas.

5-APENDICE: Una definición de tiempo físicamente razonable.

Planteamos la sincronización asociada a la definición de tiempo en un sistema de coordenadas inercial como una forma de transferencia de información: en el origen de coordenadas (por simplicidad) tenemos un reloj A(0,0,0) en reposo. En t_A se emite una señal de sincronización esférica desde el origen. Cuando la señal llega a otro reloj B(x,y,z) en reposo relativo, este debe marcar el valor $t_B = t_A + d(x,y,z)/s$; donde $d(x,y,z)$ es la distancia al origen, distancia que es constante para cada reloj en reposo respecto del reloj A(0,0,0), y s es la velocidad de propagación de la señal. Suponemos que, una vez sincronizados, los relojes mantienen su sincronismo al margen de cualquier condición física.

Esta definición presenta algunos problemas:

I-Para que este planteamiento tenga lógica, el valor s debe ser conocido previamente al menos en un sistema de referencia privilegiado (éter). Este conocimiento es una premisa anterior al uso de cualquier sistema de referencia de espacios y tiempos. No se puede medir s antes de sincronizar los relojes, ya que el tiempo no estaría definido localmente en cada punto; pero tampoco se pueden sincronizar los relojes si no se conoce s . Pero si el conocimiento que se requiere procede razonablemente de algún principio físico, entonces ¿por

qué ha de distinguir a un observador inercial determinado frente al resto, en contra del principio de relatividad?.

II-Clásicamente es razonable pensar (y así se hizo en su momento) que la señal de sincronización sea la perturbación de algún medio material. Debemos conocer la velocidad de propagación de la señal \mathbf{s} en el sistema de referencia inercial asociado a dicho medio. La definición de tiempo solo es válida para relojes en reposo con dicho medio, pues solo de esta forma la distancia recorrida por la señal es la distancia entre los relojes. Cuando los relojes, en reposo relativo entre si, se muevan respecto del medio de propagación, la distancia recorrida por la señal dependerá también del movimiento del objeto que la emite, objeto que suponemos en reposo relativo al medio de propagación; pongamos que la dependencia sea: $\mathbf{d}(\mathbf{x}+\mathbf{v}t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. Antes de la sincronización no podemos evaluar la velocidad relativa \mathbf{v} . Dependemos del observador privilegiado (éter) para que nos informe de \mathbf{v} , pero ¿que pasa si la señal utilizada no necesita ningún medio de propagación? (**n-10**).

Esta situación indica que nuestra definición de tiempo no es autosuficiente, sino que debe ser completada de alguna manera. Einstein identificó la propagación de la luz en el vacío como la señal de sincronismo mas sencilla posible *postulando* que el significado de la constante que denominamos “velocidad” de la luz en el vacío no hace referencia a movimiento alguno relativo a un medio de propagación o a un sistema de referencia inercial determinado, como pueda ser el foco emisor de luz. En cambio, si una perturbación o señal luminosa en el vacío pasa por las coordenadas cartesianas $A(x_a, y_a, z_a)$ y $B(x_b, y_b, z_b)$ de un sistema de coordenadas inercial, cualquiera que éste sea, el tiempo empleado por la luz es, por definición, la distancia entre A y B dividida por la constante que denominamos “velocidad” de la luz en el vacío: \mathbf{c} .

Este es el principio llamado de constancia de la velocidad de la luz en el vacío; aunque un nombre mas adecuado es *principio de sincronización de relojes*. Esta es la base que se requiere para solucionar los problemas I y II; también es la pieza clave entre dos cosas incompatibles desde la física clásica: las ecuaciones de Maxwell y en el principio de relatividad. También es la base cinemática para la construcción de una nueva Mecánica[1].

Intuitivamente cualquier reloj en reposo es equivalente para sincronizar al resto:

1-Reflexiva : Un reloj A esta sincronizado con sigo mismo. Evidente ya que $d(A,A)=0$ y $t(A,A)=0$.

2-Simétrica: Si B esta sincronizado con A; entonces A está sincronizado con B. Como $d(B,A)=d(A,B)$ y \mathbf{c} es *independiente del sentido*, entonces $t(A,B) = t(B,A)$.

3-Transitiva: Si B esta sincronizado con A y C está sincronizado con B; entonces C está sincronizado con A. Si $d(B,A) = \mathbf{c} t(B,A)$ y $d(C,B) = \mathbf{c} t(C,B)$ de la geometría del triángulo y dado que \mathbf{c} es *independiente de la dirección*; entonces obtenemos $t(C,A)=d(C,A) / \mathbf{c}$.

Estas 3 propiedades representan la homogeneidad o *isotropía* del tiempo en un sistema de coordenadas inercial y dependen del supuesto de que dos relojes

en reposo sincronizados mantienen su sincronismo, abstrayendo cualquier otra circunstancia física.

El principio de constancia de la “velocidad” de la luz en el vacío, las propiedades 2-3, la linealidad del espacio y el tiempo y algunos requisitos de simetría son los ingredientes utilizados por Einstein[1] para derivar las transformaciones de Lorentz. Por tanto podemos considerar que estas transformaciones de Lorentz se basan por completo en la definición de tiempo.

“El *tiempo de un sistema de coordenadas inercial* queda definido como el conjunto de indicaciones de relojes iguales en reposo relativo al observador y que registran lo mismo simultáneamente”[2].

¿Existen formas de sincronización alternativas a la basada en la luz?. Veamos esta alternativa: Tenemos un reloj patrón y el resto de relojes se mueven hasta la posición del patrón, se sincronizan con él y después se mueven hasta su posición final. Este planteamiento es incompatible con la definición de tiempo que se ha propuesto, ya que ésta predice que un reloj en movimiento atrasa respecto de uno en reposo: la marcha de un reloj depende del movimiento relativo. Esta consecuencia ha sido comprobada experimentalmente[5]; vemos que la condición de que los relojes estén en reposo es básica. Minkowsky da una explicación profunda de este hecho considerando que la coordenada tiempo es una 4ª dimensión añadida al espacio Euclídeo tridimensional (**n-11**).

La definición de tiempo por medio de un pulso de sincronización representa básicamente un proceso de transferencia de información (ppio 3.2). La física clásica cumple con el presente planteamiento sobre el tiempo con la presunción, físicamente arbitraria, de que existen señales capaces de transferir información entre un foco y un receptor a velocidad infinita ($s=\infty$). Se debate actualmente las condiciones del experimento de Alain Aspect que llevan a la posibilidad de transferir información a velocidad superlumínica[8]. El recurso a la definición que aparece en el principio de sincronismo de relojes puede parecer una forma de evitar preguntas embarazosas; casi todos creemos saber mucho sobre el tiempo[9] y así en muchos libros de física no se define el concepto. El recurso a la definición indica que estamos ante un límite de nuestro conocimiento *físico* del tiempo.

La relatividad clásica define las coordenadas inerciales como tiempo absoluto y cartesianas no afectadas por ninguna fuerza; como consecuencia se obtiene que las leyes mecánicas son invariantes en estas coordenadas. La ampliación de esta idea que lleva directamente a la teoría de la relatividad dice que las coordenadas inerciales se definen por la mayor simetría, isotropía, invarianza y en general simplicidad en la descripción de todas las leyes físicas. La integración de las ecuaciones de Maxwell en esta idea lleva a modificar el significado de la coordenada tiempo y reformular la mecánica clásica. Se creía saber todo acerca de las coordenadas inerciales, de modo que estas forzaban las leyes físicas. En el planteamiento de Einstein son las leyes físicas las que obligan a las coordenadas inerciales a comportarse de una forma determinada según las transformaciones de Lorentz. El objeto de la teoría especial de la relatividad son las propiedades y la utilización de los sistemas inerciales de coordenadas. El principio 2 supone que siempre podemos encontrar uno de estos sistemas isótropos adecuado a nuestro problema físico particular. Si la

experiencia no refrendase esto en gran medida, la teoría especial de la relatividad no tendría la importancia que tiene en física; pero...(n-12)

Notas :

n-0: *Nota sobre la covelocidad:* El valor Δr lo relaciono con las dimensiones de un objeto, el valor Δt lo relaciono con el desplazamiento relativo en el tiempo de cierta acción que ocurre dentro de los límites del objeto. Es el caso de la regla presentado en el punto 2: *El espacio y el tiempo*. La covelocidad instantánea se obtiene en el límite en que el tamaño de la “regla” tiende a cero. Cuando el objeto se aproxima a un punto, la covelocidad converge en cierto valor instantáneo no nulo. Un punto tiene velocidad y covelocidad instantáneas.

n-1: La propagación de una onda electromagnética en un medio material está asociada a la polarización de dicho medio. Esto es así por la naturaleza eléctrica de la materia. En este caso sí hay unas fuentes asociadas a la onda.

n-2: Así por ejemplo un sistema de referencia ligado a la superficie de la tierra, en intervalos de tiempo relativamente pequeños, se puede considerar prácticamente un sistema de coordenadas inercial.

n-3: De lo contrario tendríamos una forma de distinguir entre sistemas inerciales y esta distinción debiera basarse en alguna ley física; esto está en contra del principio de relatividad. Por otra parte note el lector que el planteamiento cinemático hecho atiende rigurosamente a la definición de tiempo que se da en el apéndice; no se ha utilizado en ningún momento la composición de velocidades de la mecánica clásica.

n-4: El planteamiento supone la existencia de relojes en reposo sincronizados y espacialmente separados en los lugares donde los sucesos ocurren.

n-5: Una carga no interactúa simultáneamente con varios centros de fuerza distantes (acción a distancia: 3ª ley de Newton), sino que solo hay *una acción* local del campo único (fuerza de Lorentz : $\mathbf{F}=q(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})$). Sin embargo la física cuántica parece prescindir del requisito de causalidad.

n-6: La física actual asocia una energía al vacío, cuyos efectos se han comprobado experimentalmente en el efecto Casimir. Este efecto muestra que el vacío es un sistema físico que puede intercambiar energía con otros sistemas físicos. En mi opinión, asociar una energía al vacío equivale a decir que no se sabe de que foco proviene.

n-7: Este caso excluye la radiación de una carga acelerada por la gravedad.

n-8: Según Heisenberg la propia observación de la materia, es decir, la extracción de información, provoca este colapso. Parece que no hay forma de asociar la medida de un estado cuántico a una cadena determinada de sucesos, a la manera clásica. En física clásica el aparato de medida interviene en la cadena causal asociada al objeto a medir de una forma determinada; se sabe como afecta el aparato de medida al objeto medido y viceversa. Para los objetos que maneja la física cuántica el papel del aparato de medida es similar

a un juego de dados: se conocen los resultados posibles y sus probabilidades; pero no se sabe, en general, cual será el resultado de una medida (jugada) determinada.

n-9: La consecuencia de este colapso es que, para el observador, la materia aparece según la imagen de la física clásica: “Creo que el concepto de trayectoria clásica puede entenderse de esta forma: La trayectoria se manifiesta solo cuando está asociada a un fenómeno de observación.” (Heisenberg-1927). Las ecuaciones 2.1 y 2.2 son las de la mecánica de un punto material, por tanto toda interacción, tal como se ha definido, supone el colapso de la onda cuántica. El término colapso hay que entenderlo como cambio de estado cuántico. Un estado cuántico puede ser medido físicamente.

n-10: Esta es la situación que resulta del experimento, planteado bajo ideas clásicas, de Michelson y Morley: Si existe una velocidad relativa entre la tierra y el “éter luminífero”, entonces resulta imposible medirla experimentalmente[6].

n-11: El espacio de Minkowsky es un espacio muy parecido al Euclídeo pero que consta de relojes puntuales en vez de puntos; estos relojes puntuales están descritos por cuatro dimensiones independientes : x, y, z, t . En principio es posible definir un sistema *ortogonal* con estas coordenadas. En una situación no ortogonal puede ser que el eje de tiempos tenga proyecciones sobre alguno de los otros ejes. Así se puede decir, por ejemplo, que la dirección t proyecta sobre la dirección x de una manera similar al caso Euclídeo en que las direcciones x, y no sean perpendiculares. En el espacio de Minkowsky esto significa que los relojes puntuales que utilizamos como referencia se mueven sobre la dirección x . La ortogonalidad del sistema de coordenadas se logra al anular estas proyecciones, es decir, cuando todos los relojes puntuales que utilizamos como referencia están en reposo.

De paso, esto justifica las ecuaciones 1.8: los relojes puntuales del sistema en movimiento relativo no se mueven sobre las direcciones y, z , solo sobre la dirección x . De este modo, el eje t_+ proyecta sobre el eje x . y el eje x_+ sobre el t_+ ; es similar a un giro entre dos sistemas de ejes ortogonales: (t_+, x_+) y (t, x) .

n-12: Es un hecho experimental que, de acuerdo con la *teoría general de la relatividad*, los relojes en reposo situados a distinto potencial en un campo gravitatorio pierden su sincronismo inicial progresivamente. La isotropía del tiempo solo es válida en el límite de campos gravitatorios débiles e intervalos de tiempo suficientemente cortos. A causa del movimiento relativo y de la diferencia de potencial de cada satélite respecto de la superficie terrestre, el sistema G.P.S debe coordinar los relojes de cada satélite con los relojes de las estaciones de control en tierra cada cierto tiempo (2 minutos). Esto supone que los sistemas de coordenadas ligados rígidamente a las fuentes de un campo gravitatorio “débil” solo pueden ser aproximadamente inerciales; sin embargo un sistema de coordenadas en caída libre en cualquier campo gravitatorio puede considerarse *instantánea y localmente* inercial. Esta es la interpretación que introdujo Einstein de la equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria; una de las bases de la teoría general de la relatividad.[2] Podemos imaginar que los ejes cartesianos x, y, z estén hechos de algún material rígido e indeformable. Un eje temporal rígido significa que la velocidad de la luz es

independiente del campo gravitatorio, pero esto va en contra del famoso experimento mental en que Einstein interpreta la equivalencia de la masa inercial y la masa gravitatoria[2].

Bibliografía

- [1]J.Stachel: Einstein 1905 un año milagroso. Ed. Drakontos Clásico.
Capítulo 3: Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.
- [2]A.Einstein: El Significado de la Relatividad. Ed Planeta-Agostini.
- [3]Landau-Lifshitz:Teoría Clásica de Campos. Ed. Reverté 2ª edición.
- [4]Bredov-Rumiantsev-Toptigin:El Campo Electromagnético. Ed. MIR.
- [5]Feynman- Leighton-Sands:Lecciones de Física de Feynman. Vol 2. Ed. McGraw-Hill
En especial el capítulo sobre la masa electromagnética.
- [6]R.K.Wangsness: Campos Electromagnéticos. Ed. Limusa.
- [7]P.Kittel: Deducción Elemental de la Estructura Fina del Espectro del Hidrógeno.
<http://cabierta.uchile.cl/revista/18/educacion/edu10/>
- [8]R.Penrose: La Nueva Mente del Emperador. Ed. Mondadori. *Capítulos 5 y 6.*
- [9]*Un interesante ensayo de Xabier Zubiri sobre el tiempo está en:*
<http://www.zubiri.org/works/spanishworks/Conceptodescrip.htm>