VIAJE HASTA LOS LÍMITES DE LA FÍSICA CLÁSICA

ENRIQUE CANTERA DEL RÍO
Lcdo en Ciencias Físicas

be ahavá

RESUMEN:
En base al concepto de fase de una onda se hace una revisión 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

Octubre-2004

1-INTRODUCCION

A los 16 años Einstein se hizo la siguiente pregunta: Si un observador inercial es capaz de moverse a la velocidad (constante) de una onda electromagnética plana, ¿como vería 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 verían 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 (ley de Gauss;**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 Fáraday 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 clásico 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 Fáraday y Ampere-Maxwell. Esto, a la vez que da una alternativa de solución al problema, 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 las propiedades cinemáticas de los diferentes tipos de ondas que se dan en la naturaleza. Este estudio se puede hacer considerando 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*: Las leyes físicas son independientes del estado de movimiento de cualquier observador inercial.

2-*Límite de la velocidad de la luz*

  2.1-La velocidad de la luz en el *vacío* es una constante física.

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

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

4-La fase de cualquier onda plana: **k*Δr-wΔt,** 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 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.
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. Veremos que un examen mas profundo (Einstein, 1905) elimina la impresión de caos arbitrario y restablece la idea de *Universo* en física mediante el principio de relatividad.
El descubrimiento del carácter relativo del tiempo se basa en el análisis de sucesos simultáneos.
Supongamos el siguiente 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 un pulso electromagnético esférico 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 **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 del pulso que se mueve en contra de la velocidad relativa recorre menos espacio hasta el extremo correspondiente que la parte del pulso que se mueve en el mismo sentido que la velocidad relativa. Si el pulso 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. 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:

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

Por otra parte, note el lector que la experiencia sobre simultaneidad que se propone puede ser utilizada para *sincronizar* relojes en reposo espacialmente separados. La sincronización así definida es una relación de *equivalencia* entre todos los relojes en reposo en un sistema inercial determinado, y por tanto se puede utilizar para *definir* el tiempo físico para un sistema de coordenadas asociado a un observador inercial en particular. Esta es la idéa que utiliza Einstein en su famoso trabajo de 1905 [1].

Las propiedades del espacio y el tiempo: Linealidad, Relatividad y Simetría.
Debemos encontrar alguna regla que nos permita relacionar los espacios y los tiempos de las acciones físicas 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 puede ser esta regla?: a falta de otro criterio, debe ser lo mas sencilla posible.

Una acción física (A) está limitada, al menos, por dos *sucesos*: dos conjuntos de coordenadas **x, y, z, t**. 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. La relación mas sencilla de los tiempos y espacios de estas acciones es la *lineal*:

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

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_l cambia de posición y este término no se anula. Esto representa la relatividad del espacio. Estos términos, $t(A_S)$ y $e(A_l)$, tienen una propiedad de *asimetría* directamente relacionada con el movimiento relativo. La forma mas 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 (ec. 1.1), que

$$\mathbf{v_- = -v_+}$$

Y que la longitud de la regla móvil: $\mathbf{x_2\text{-}x_1}$, 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-2**).
Quedan otras dos componentes del espacio y el tiempo por analizar: el tiempo local $t(A_l)$ y el espacio simultáneo $e(A_S)$. Las propiedades de estas magnitudes son notoriamente diferentes. La longitud de una regla , es decir, el espacio simultáneo, no puede anularse para ningún observador inercial y es independiente de la dirección de su velocidad relativa. La marcha de un reloj, es decir, el tiempo local, tampoco puede detenerse por efecto de la velocidad relativa y es independiente de la dirección de esta velocidad. 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.

La 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 igualdad de fase tenemos:

$$-w_+\Delta t^l = k_- v_- \Delta t \; - w_- \Delta t \qquad (a)$$
$$-w_-\Delta t^l = k_+ v_+ \Delta t \; - w_+ \Delta t \qquad (b)$$

Dividiendo (a) por w_- y (b) por w_+, multiplicando las ecuaciones y dado que *w/k = c:*

$$\Delta t = \Delta t^l \ \beta^{-1}; \quad \frac{w_-}{w_+} = \frac{k_-}{k_+} = \sqrt{\frac{1-\frac{v_+}{c}}{1-\frac{v_-}{c}}} \quad ; \quad \beta = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (1.3)$$

La 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:

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

La 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:

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

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

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

Transformación completa del 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:

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

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

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

Dilatación de tiempos locales (relojes en reposo y en movimiento)
Supongamos un reloj en reposo para el observador “+”. Para “-“ se moverá con la velocidad v_ de modo que según (1.7): Δt^l_- **v_-=**Δx^s_- . Recordemos que Δt^l_- es el tiempo local en “-“ y por tanto medido por un reloj en reposo. Si suponemos el mismo origen de tiempos para los relojes de “+” y de “-“ que estamos utilizando, tenemos que para un reloj en reposo situado en cualquier valor de x_- es

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

por tanto, para el observador (“-“), un reloj en movimiento (t+) atrasa respecto de uno en reposo (t-). No es posible para un observador inercial sincronizar relojes en reposo con relojes en movimiento, y por tanto, la definición de tiempo [1] no es ampliable mas allá de un sistema inercial dado.

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 direcciones son como si la velocidad relativa se anula:

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

Cinemática elemental: *¿qué* se mueve?
Todo movimiento supone una relación entre las coordenadas espaciales y el tiempo. Las relaciones mas sencillas que pueden establecerse son:

$$\Delta \vec{r}_- = \Delta t_- \vec{A}_- \qquad (1.A) \qquad\qquad \Delta t_- = \vec{B}_- \cdot \Delta \vec{r}_- \qquad (1.B)$$

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

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

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

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

Evidentemente 1.A representa el movimiento 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. 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 1.B se asocia con un giro, vibración o spin interno de la partícula[6]. 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 longitud de onda

Aplicando las transformaciones 1.6, 1.7 y 1.8 al invariante de fase para una onda plana cualquiera que se propaga en una dirección dada se obtiene, considerando que (x,y,z,t) pueden tomar cualquier valor:

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

Para ver 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 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 o pulsos en una cuerda tensa. 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.

II- Existe un observador inercial que no es capaz de medir la longitud de onda con una regla en reposo: k_ = 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. 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 se supuso para la luz). Por su naturaleza estas ondas *no* admiten condiciones de contorno espaciales y 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 bien puede llamarse *onda cuántica.* El comportamiento de estas ondas las hace esquivas a nuestra experiencia diaria, pero si cumplen los principios a que nos atenemos debe considerarse su existencia igualmente que el resto de los casos .

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. 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-3**).

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 desdobla 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 entre onda espacial y onda temporal; el paquete de ondas es solo una forma de conseguir esta asociación y también es solo una forma de hablar de velocidades superiores a la de la luz.

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, directamente relacionados con la frecuencia y el vector de ondas de la onda asociada:

$$E = \hbar w; \qquad \overline{P} = \hbar \overline{k}$$

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

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

Estas relaciones son las mismas que en relatividad se introducen para una partícula(onda espacial), pero note el lector que ahora se han deducido de las propiedades de un objeto (onda temporal) que se mueve a una velocidad superior a la de la luz. 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 posibles relaciones invariantes entre modificaciones de Energía y modificaciones de Impulso. Las mas sencillas, siguiendo el esquema dual ya utilizado, son las siguientes:

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

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 (ec 1.9). La aplicación de las transformaciones de energía/impulso a la ecuación (2.b) da

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

Es decir**, b** se transforma como una velocidad dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz.

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:

$$dE_a = \vec{V}.d\overrightarrow{P_a} \qquad (2.1)$$

Para 2.b el factor invariante **b** es la velocidad de la partícula dividida por el cuadrado de la velocidad de la luz: **V/c²**. Utilizando la equivalencia masa-energía, la ecuación representa una variación de impulso de la partícula debido a una modificación instantánea de masa.

$$\frac{dE_b}{c^2}\vec{V} = d\overrightarrow{P_b} \qquad (2.2)$$

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

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

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.

<u>Planteamiento de la mecánica de una partícula eléctricamente cargada y acelerada</u>

El comportamiento de una carga acelerada, con idependencia 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 Pointing; consecuencia lógica de las ecuaciones de Maxwell. El punto clave es la interpretación del vector de Pointing (**S**=**E**x**H**), 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. 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, tal como sería de esperar si la radiación fuese un comportamiento del sistema, sino a la *aceleración de una carga respecto de cualquier sistema 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 autofrenado, sin embargo aquí solamente se supondrá su existencia y las propiedades que esta fuerza debiera 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 **dEr** 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 **dEr.**
Otra propiedad de la radiación emitida es que, para un observador inercial en reposo instantáneo respecto del punto cargado, la radiación se emite de forma simétrica respecto de dicho punto, de forma que el impulso total emitido por la radiación **dPr** se anula.
Si hacemos que la velocidad **v_** entre dos sistemas de referencia inerciales coincida con la velocidad **V_** de la partícula en el instante **dt_** entonces en el instante correspondiente $\mathbf{dt_+}$ la partícula está en reposo para el observador "+" , y por tanto para el impulso de radiación instantáneo será $\mathbf{dPr_{+x}}$ =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 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, 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:

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

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:

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

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:

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

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 al principio; calculada teóricamente por Abraham y Lorentz. Por tanto, los términos de la izquierda de las ecuaciones 2.6 constan de dos partes: el campo externo 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 externa 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 $\mathbf{F_{af}}$ 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:*

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

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 la energía potencial del sistema electromagnético. Es decir, hay que considerar el teorema de Pointing completo.

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 mas allá de este límite…?.

Desde el Límite

La fuerza de Lorentz :**F**=q(**E**+**v**x**B**), introduce la masa mecánica en el conjunto de las ecuaciones de Maxwell; en particular introduce la energía cinética en el teorema de Pointing. 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. 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.

Sin embargo, el problema de la estabilidad no es 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. 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. Supongamos por tanto una duración para un proceso que las relacione. El carácter de este tiempo 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. La onda definida en las ecuaciones de De Broglie cumple la condición cinemática establecida para la duración (periodo) del proceso local de tensión-compensación; basta considerar que el impulso mecánico local en el sistema de referencia propio de la partícula es nulo. Esta posibilidad apunta a la existencia de una conexión o acoplo entre la onda cuántica temporal y el campo electromagnético, de modo que hay un flujo de energía asociado a la radiación (y a la modificación de 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. Pero si la onda cuántica se modifica para absorber el aumento de energía interna de la partícula habríamos encontrado un foco para modular dicha onda, lo cual no es posible por principio. Para explicar esto considero que existen unos límites para la modulación de la onda cuántica determinados por la relación **$\Delta E\ \Delta T = h$**. 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 borran todas las huellas. 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 la onda, dado que la energía transferida y el tiempo empleado son compatibles con las condiciones de contorno de la onda cuántica. 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.

4-CONCLUSIONES

La representación mas 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 mas profunda. La onda espacial necesita un espacio simultáneo pero no tiene limitaciones temporales; lo mas 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* que provoquen el colapso de la onda cuántica(**n-4**). 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 (autofrenado 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.

Notas :

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.
n-2:Una carga no interactúa simultáneamente con varios centros de fuerza (acción a distancia: 3ª ley de newton), sino que solo hay *una acción* local del campo único (fuerza de Lorentz :$\mathbf{F}=q(\mathbf{E}+\mathbf{v}\times\mathbf{B})$).
n-3: La física actual asocia una energía al vacío, comprobado experimentalmente en el efecto Casimir.
n-4:Según Heisemberg la propia observación de la materia, es decir la extracción de información, provoca este colapso. La consecuencia de este fenómeno 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." (Heisemberg-1927).
El observador puede ser independiente de las ondas del caso I, ya que estas se propagan en un medio material. Pero el observador no puede ser independiente de las ondas del caso II ya que comparten un medio común: el vacío. Aparece de este modo un problema en la medida de dichas ondas, ya que las propiedades del vacío se pueden modificar "involuntariamente" por la existencia de campos.

Bibliografía

[1]J.Stachel :Einstein 1905 un año milagroso. Ed. Drakontos Clásico.
Capitulo 3: Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento.
[2]A.Einstein : El significado de la relatividad. Ed Planeta-Agostini.
[3]Landau-Lifschizt : Teoría Clásica de Campos. Ed. Reverté 2ª edición.
[4]Bredov-Rumiantsev-Toptiguin: El Campo Electromagnético. Ed. MIR.
[5]Feynman-Leighton-Sands: Lecciones de Física de Feynman. Vol 2. Ed. McGraw-Hill
[6]P.Kittl: Deducción Elemental de la Estructura Fina del Espectro del Hidrógeno.
http://cabierta.uchile.cl/revista/18/educacion/edu10/

Autor

Enrique Cantera del Rio. Lcdo en Física.
arce1@usuarios.retecal.es

Octubre-2004