

ESPACIO, TIEMPO, MATERIA Y VACIO

ENRIQUE CANTERA DEL RÍO

be ahavá

RESUMEN:

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. Se hace un perfil del límite entre la física moderna y la física clásica.

Índice

- 1..... INTRODUCCIÓN
- 2..... ESPACIO Y TIEMPO
- 3..... MECÁNICA DE UNA PARTÍCULA
- 4..... CONCLUSIONES
- 5..... APENDICE I: Una definición de tiempo físicamente razonable
- 6..... APENDICE II: Campo, inercia y condiciones de contorno.
- 7..... APENDICE III: El Universo y las Leyes físicas.
- 8..... APENDICE IV: Objetos, Acciones y Gramática.
- 9..... NOTAS, PROBLEMAS Y SOLUCIONES.
 - El tubo y la barra*
 - Osciladores y ondas*
 - Choque elástico de dos partículas*
 - Paradoja de los gemelos*
 - Relatividad y Coordenadas no inerciales*
 - Los cohetes espaciales*
 - La barra y la esfera*
 - Transformaciones de coordenadas*
 - Introducción elemental de la métrica de Schwarzschild*
- 10..... EPILOGO
- 11..... BIBLIOGRAFÍA
- 12-APUNTE SOBRE EL CONCEPTO DE INERCIA Y LA MECÁNICA CUÁNTICA

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 tiene propiedades ondulatorias *intrínsecas* respecto a la propagación de ondas electromagnéticas. 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. Si la luz es una onda electromagnética entonces 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 y es lo que se conoce como efecto Doppler.

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 rígido se puede asociar un observador inercial. En general suponemos que se puede hablar del sistema de coordenadas inercial *instantáneo* asociado a un objeto físico en el instante dt , de modo que en este instante la velocidad relativa del 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.
Esta condición se extrae directamente del electromagnetismo.

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: $\vec{k} \cdot \Delta \vec{r} - w \Delta t$, es invariante entre observadores inerciales.

2-ESPACIO Y 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 nuestra intuición física.

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 **x, y, z, 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*:

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

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 $\Delta t(A_s) = 0$, pero para cualquier otro en movimiento relativo este término no se anula, como se ha visto antes. Es un tiempo *inducido* por el movimiento relativo y por tanto representa la *relatividad* del tiempo. Para el observador que verifique la localidad de A_l , será $\Delta e(A_l) = 0$, pero para cualquier otro observador en movimiento relativo, la acción A_l cambia de posición y este término no se anula. Es un espacio *inducido* por el movimiento relativo y por tanto representa la *relatividad* del espacio. Estos términos, $\Delta t(A_s)$ y $\Delta e(A_l)$, 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 “ Δe ”. 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 “ $-\Delta e$ ” (Transformación de Galileo).

Si el observador “+” mide el tiempo de una acción que sea simultánea para el observador “-”, obtendrá un valor “ Δt ”. 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 “ $-\Delta t$ ”.

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 los sucesos simultáneos no pueden estar relacionados causalmente ya que no existe un orden objetivo para ellos. 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 $\Delta t(A_l)$ y el espacio simultáneo $\Delta e(A_s)$. 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. (n-5') 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 .

El vacío tiene la capacidad intrínseca de propagar ondas. Suponemos ahora que en nuestro sistema se mueve una onda plana en el vacío 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:

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

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:

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

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

$$\Delta x_m^s = \Delta x_r^s \beta \quad (1.5)$$

Una regla móvil es mas corta comparada con otra físicamente igual pero en reposo. El tamaño de los objetos físicos se determina por medio de un proceso simultáneo y por tanto dicho tamaño es relativo al sistema de coordenadas. (n-19)

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:

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

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

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

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 en reposo para "-". Si suponemos el mismo origen inicial de tiempos para "+" y para "-" (de nuevo según la definición de tiempo) tenemos que el tiempo medido en "-" es el de aquel reloj en reposo que coincida espacialmente en cada instante con el reloj móvil, obtenemos de (1.6) que la medida del tiempo en "+" y la medida del tiempo en "-" cumplen:

$$t_m^l = t_r^l \beta \quad (1.6')$$

Por tanto, un reloj en movimiento (sistema +: t_m^l) *atrás* progresivamente comparado con uno en reposo (sistema -: t_r^l) en la localización correspondiente. 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 mas de un sistema inercial. La duración de un proceso se determina por medio de un proceso local, y por tanto dicha duración es relativa al sistema de coordenadas.

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:

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

Cinemática elemental: ¿qué se mueve?

Hemos determinado los conceptos de espacio y tiempo, pero ¿qué debemos entender por *movimiento*?. Este concepto es de radical importancia ya que enlaza directamente con la *Mecánica* y el *Electromagnetismo*. Todo movimiento supone una relación entre intervalos de posición e intervalos de tiempo. Las relaciones mas sencillas que pueden establecerse son:

$$\Delta r_- = \Delta t_- A_- \quad (1.A) \quad \Delta t_- = B_- \cdot \Delta r_- \quad (1.B)$$

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 en un intento de mantener la idea unitaria de movimiento. 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] (**n-6**). Evidentemente ambas expresiones son *incompatibles* y se refieren a movimientos diferentes. 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:

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

Note ahora el lector esta “diferencia”: Las transformaciones de Lorentz (ecs 1.6,1.7 y 1.8) relacionan espacios y tiempos que dos observadores inerciales en movimiento relativo atribuyen a una *única* acción. Sin embargo 1.10 relaciona las medidas de frecuencia y longitud de onda que dos observadores inerciales hacen de una *única* onda. Estas medidas representan acciones diferentes. Si el observador A mide la frecuencia de una onda con un reloj en

reposo, esta acción no es válida para el observador B como medida de la frecuencia. Esto es debido al principio de invarianza de la fase.

Pretendo ahora clasificar el comportamiento de las ondas en función del *movimiento* relativo al observador. El análisis que sigue depende de la ampliación del principio 2 para cualquier onda: existe un sistema de coordenadas inercial en el que una onda plana no se mueve. Note el lector también que las ecuaciones (1.10) solo dependen de los observadores relacionados y no del medio de propagación de la onda.

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; la distancia entre cresta y cresta es 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 límites temporales objetivos para cualquier observador inercial, y sabemos que admiten límites espaciales, como espejos por ejemplo. Llamemos a este caso *onda espacial*.

Tenemos ejemplos reconocibles de estas ondas: ondas transversales como las ondas en la superficie del agua, pulsos en una cuerda tensa, ondas electromagnéticas en líneas de transmisión y en medios refringentes (fibra óptica e.t.c). 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. La propagación de estas ondas necesita de las propiedades físicas de algún medio material; de este hecho depende el que haya observadores para los que el movimiento de la onda se anula (ppio 2).

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. Si consideramos que el movimiento de estas ondas corresponde a una velocidad, entonces siempre es por encima de la “velocidad” de la luz, por tanto, según el principio 3.2, *no es posible encontrar un foco emisor real para ellas*. Según el principio 2, dado que estas ondas nunca están en reposo, no puede definirse una referencia inercial para su movimiento. Así las cosas parece que estas ondas están mas allá de nuestros principios o no existen.

Sin embargo todavía podemos pensar que su movimiento corresponde a una covelocidad; la cual suponemos asociada a una velocidad real medible desde un sistema inercial.

Las ideas que siguen son una especulación sobre las propiedades de las “ondas de covelocidad”.

Si estas ondas (de covelocidad) se pueden utilizar para transferir información entre un emisor y un receptor, para el observador todo sería como si la información se transmitiese a velocidad superior a la de la luz, lo cual suponemos que no puede ser medido físicamente. La alternativa que propongo es que *el observador no es capaz encontrar un foco manipulable a su voluntad para modular estas ondas*. Según el *principio de Huygens*, la llegada de una onda 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. Este comportamiento se acepta al menos para la luz. Análogamente al caso anterior, por su naturaleza estas ondas *no* admiten en este caso límites espaciales: son continuas en el espacio. El aparente sentido único del tiempo no hace probable la existencia de límites 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 *límites 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*. Ejemplo de ondas espacio-temporales es 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-7).

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 más 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[10]. 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)(**n-8**). 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

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

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 *diferentes*. 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

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

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 Poynting. Hay una relación directa entre el movimiento del sistema de cargas y la radiación. H.A. Lorentz fue más 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 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 (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. (**n-16**)

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 y corresponde a la acción adicional introducida antes. 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 \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*:

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

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-9**).

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. Consecuentemente introduce también el concepto de corriente eléctrica como el movimiento de partículas cargadas. 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 el periodo ($1/\omega$) de alguna onda temporal (o con la marcha de algún “reloj interno” de la partícula). 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 algo con capacidad de acción y que puede 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 una expresión del tipo $\Delta E \Delta T \approx h$. Esta expresión define un límite temporal, una condición de contorno temporal. Si una onda colapsa e intercambia 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-10**). 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 que parte de su foco 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, radio-astronomía... 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 y tiempo 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 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 u otras causas que provoquen el colapso de la onda cuántica(n-11). Esta asociación fundamental de ondas depende de una pieza clave: la *inercia* o masa de la partícula. La radiación está asociada a fluctuaciones de la 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 (2ª Ley de Newton: toda aceleración es forzada) o de oposición a la radiación (fuerza 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. Note el lector la ampliación del concepto de *inercia* que aquí se presenta, este concepto se puede resumir en base al principio de equivalencia masa-energía diciendo que la inercia de un objeto físico es la *oposición a la modificación de su energía*.

Por otra parte aparece un nuevo objeto de estudio en física: el *vacío*. Además de sus propiedades geométricas aparece también con propiedades ondulatorias referentes a la capacidad intrínseca de propagar ondas.

La relatividad especial define una relación intrínseca entre espacio y tiempo; la relatividad general una relación intrínseca espacio-tiempo-materia; de lo aquí expuesto la onda cuántica representa una relación intrínseca materia-vacío. En la física clásica *espacio, tiempo, materia y vacío* son conceptos independientes e indudables, en el sentido de la filosofía cartesiana. Estos conceptos solo se relacionan clásicamente a través del *movimiento inercial* de una partícula. La física actual parece ir profundizando poco a poco esta primera aproximación clásica sobre la unidad que forman *espacio-tiempo-materia-vacío*.(n-12)

5-APENDICE I: 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 información. 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 *directamente* 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 . Si la medida directa no es posible entonces hay que recurrir a una medida indirecta basada en alguna propiedad de la señal utilizada. Pero si la propiedad requerida 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?.(n-17)

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 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; pongamos que la dependencia sea: $d(\mathbf{x}+\mathbf{v}t, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. 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-13).

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: *para todo* sistema de coordenadas inercial, si una perturbación o señal luminosa en el vacío tiene su foco en $A(x_a, y_a, z_a, t_a)$ y es recibida en $B(x_b, y_b, z_b, t_b)$; entonces el tiempo empleado por la luz: t_b-t_a es, por definición, la distancia entre $A(x_a, y_a, z_a)$ y $B(x_b, y_b, z_b)$ dividida por la constante que denominamos “velocidad” de la luz en el vacío: 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*. Este principio establece el carácter de constante universal de la velocidad de la luz en el vacío, entendiéndose por universal al conjunto de todos los sistemas de coordenadas inerciales posibles; se puede definir un sistema de coordenadas inercial como aquel en que la velocidad de la luz en el vacío es una constante isótropa. 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 está sincronizado con A; entonces A está sincronizado con B. Como $d(B,A)=d(A,B)$ y c es *independiente del sentido*, entonces $t(A,B) = t(B,A)$.

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

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-14**).

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 y otros relativos a partículas cuánticamente entrelazadas que hacen pensar en 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 fuerte apuesta está en la palabra “todas”. 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-15)**

6-APENDICE II: Campo, inercia y condiciones de contorno.

Un campo matemático es una función de varias variables: $f(x,y,z,t)$; sin embargo hay un matiz: (x,y,z,t) no representa un punto de la mecánica. Ahora x,y,z,t es simplemente un punto de nuestro sistema de coordenadas asociado a un suceso físico “f”. No consideramos el movimiento de este punto, sino la propagación de la señal representada por “f”. En el problema clásico de la cuerda tensa, la forma de la cuerda es una función $y=f(x,t)$. Esto no es un campo ya que f representa el movimiento de los puntos que forman la cuerda. Esta ecuación se puede poner como $F(x,y,t) = 0$; lo cual da el movimiento de cada punto “x” si suponemos que este movimiento es unidimensional en “y”.

Un campo es una zona del espacio en la que se manifiesta una determinada propiedad física: la fuerza eléctrica, la gravedad, etc..con independencia, en principio, de si existe un soporte mecánico o material para ella.

El planteamiento de las leyes físicas utilizando el concepto de campo marca un punto de inflexión muy sutil en la historia de la física. Inicialmente tenemos la partícula mecánica, que es útil en base a la identidad que proporciona a cualquier forma de movimiento. Inicialmente se piensa que cualquier movimiento de la naturaleza se basa en el movimiento de las partículas que estructuran la materia. El campo no proporciona de por si ninguna identidad a las partículas en que pueda sustentarse la propiedad física que describe, solamente expresa que en un punto del espacio y del tiempo ha ocurrido algún suceso medible. En el caso del campo lo relevante es el movimiento del propio espacio; es decir, si el espacio que se utiliza es inercial o no y como afecta esto a las *leyes del campo*. Esto queda solucionado automáticamente si se supone que hay un fundamento mecánico de estas leyes que se expresan por medio del objeto matemático campo. Eso es lo que hace Euler con las leyes hidrodinámicas utilizando el campo de velocidades de un fluido: $v=f(x,y,z,t)$ y las leyes de Newton para una partícula. Las leyes del campo tratan de relacionar el comportamiento $f(x,y,z,t)$ con el comportamiento $f(x+dx, y+dy, z+dz, t+dt)$. De esta forma se introduce la causalidad: el campo describe una serie de sucesos $f(x,y,z,t)$ que están relacionados causalmente.

En relatividad el concepto de campo electromagnético debe considerarse como fundamental, sin base material. El campo ya no es simplemente una forma

conveniente de plantear las leyes físicas. Hay leyes que no se pueden plantear sin este concepto, ya que la ausencia de base material pasa a ser fundamento. De este modo el problema para el electromagnetismo es el inverso al caso clásico: ¿Qué papel juega la inercia en las leyes del campo?. En el planteamiento clásico este problema quedaba saldado directamente por la utilización de las leyes mecánicas para establecer las leyes (ecuaciones diferenciales) del campo; en relatividad se opta por replantear el concepto de coordenadas inerciales.

Pese a que desde la mecánica y desde el electromagnetismo se llegue al mismo tipo de ecuación de onda para la propagación de las acciones físicas hay una diferencia fundamental: la forma de establecer las condiciones de contorno sobre esta ecuación. En mecánica se hace referencia a la posición y velocidad inicial de las partículas. Para una onda electromagnética esta forma ya no es posible; pero existen otras formas. Saber electromagnetismo es en gran parte saber las diferentes condiciones de contorno de las ondas electromagnéticas. El papel fundamental de las ecuaciones diferenciales en la física conlleva también gran importancia para las condiciones de contorno aplicables a estas ecuaciones. Puede que en muchos casos la determinación de las condiciones de contorno sea una cuestión sencilla e intuitiva; en otros casos no lo será y en general nunca debe subestimarse su importancia en un problema físico.

7-APENDICE III: El Universo y las Leyes físicas.

El primer postulado de la Relatividad General dice que las leyes físicas son iguales para cualquier observador, independientemente de su movimiento.

¿Cómo se obtiene una Ley Física?. Los pasos a seguir son mas o menos éstos[11]:

1-A partir de la observación y experimentación se va identificando un proceso físico. Se obtiene una descripción inicial de dicho proceso.

2-Control de variables: a partir de una experimentación mas depurada, o de alguna otra forma, se obtienen las variables relevantes en la descripción del proceso.

3-Modelo Empírico: Se intenta una primera relación matemática entre las variables relevantes.

4-En base a los datos anteriores se crea, como actividad intelectual, un modelo conceptual mas general y se traduce, si es posible, a un modelo matemático. En este momento a los datos se les da un contexto: pasan a tener significado, están ahí por algo, pasan a ser *información*. Este es el dominio de la ley física.

5-Se valida la Ley haciendo experimentos guiados por las predicciones del modelo.

La Teoría de la Relatividad dice algo sobre el proceso de la elaboración de las leyes físicas: Si las leyes físicas son las mismas para diferentes observadores, también la información que pueden obtener estos de los procesos físicos debe

ser la misma o equivalente. Además existe un modelo matemático: el espacio-tiempo de Minkowsky, en el cual la *información* física que puede obtener un observador es la misma o es equivalente a la de cualquier otro observador. Siguiendo a Einstein, llamamos Universo al conjunto de información común a todos los observadores; y suponemos que esta información se ordena en Leyes físicas. Pero existe la información y también existe la *incertidumbre*. Tomemos la conocida experiencia de las dos rendijas de difracción: ¿Por que rendija ha pasado el fotón?. Esta información no esta disponible para el observador[12]. Si esto es así, si este hecho es real, si es parte de nuestro Universo, entonces la relatividad debiera asegurar que esta información no está disponible para ningún observador inercial. ¿Cómo puede la relatividad llegar a esta conclusión?. La forma mas lógica es demostrando que, de lo contrario, habría transporte de información a velocidad superlumínica. Creo que la no disponibilidad de esta información está relacionada con el fenómeno de colapso de la onda cuántica cuando se utiliza un medidor para saber por que rendija pasa el fotón. El colapso representa la incapacidad de modular una onda cuántica; lo que conlleva la incapacidad de transmitir información a velocidad superlumínica.

8-APENDICE IV: Objetos, Acciones y Gramática.

En el índice 2 de este trabajo se presentan las ideas de espacio y tiempo asociadas a acciones físicas. Este matiz puede parecer innecesario, sin embargo trataré de hacer ver al lector que esta sutileza está en la raíz del gran cambio que dio la física a principios del siglo XX.

Propongo al lector la siguiente pregunta: Partiendo de nuestra experiencia física, ¿Que conocemos realmente, objetos físicos o acciones físicas?.

En realidad esta pregunta se realiza continuamente a lo largo de toda la historia de la física. Pensemos en el caso del *calórico*. El calor se comprendió inicialmente como un objeto físico: el calórico. Posteriormente la Termodinámica estableció que el concepto debía considerarse como una forma de interacción física. Pensemos en los fotones o los electrones. La polémica todavía sigue viva pero inicialmente se consideraron objetos. Para la interpretación mas aceptada de la mecánica cuántica se trata de *fenómenos* que no es posible separar del aparato de medida que se esté utilizando.

Por tanto una postura razonable es pensar que, en realidad, solamente conocemos acciones físicas. Estas acciones actúan sobre nuestros sentidos o sobre nuestros aparatos de medida. “Materializamos” esta idea al asignar espacio y tiempo solamente a las acciones, no a los objetos. Esta es la sutileza: La física clásica concibe el espacio o extensión como una *propiedad* de los objetos físicos; repare el lector en el concepto de densidad. El objeto físico es una materialización del objeto mental de la geometría Euclídea, esto puede considerarse un axioma de la física clásica. En cambio la relatividad asigna espacio y tiempo al acto de medir: la acción espacio-simultánea y la acción tiempo-localizada. La longitud o volumen de una regla no es una propiedad exclusiva de la regla; el ritmo de un reloj no es una propiedad exclusiva del reloj. Esto depende también del movimiento relativo al observador.

Finalmente pensemos en la famosa relación $E=mc^2$. Desde Newton concebimos la masa como algo propio de los objetos. Representa la materialidad de los objetos. Por otro lado la Termodinámica nos dice que la energía es un parámetro característico de las acciones físicas, no característico de los objetos físicos. De hecho la elección de un origen de energías es una decisión arbitraria. Por tanto la famosa ecuación se puede interpretar diciendo que la masa es una forma de acción física.

Conclusión: No existen objetos, solo existen acciones físicas.

Supongamos que la conclusión es legítima. En tal caso tenemos un serio problema...nuestro propio lenguaje natural. La regla *gramatical* mas elemental es que una frase consta de sujeto+acción+objeto. Si eliminamos sujeto y objeto nuestro lenguaje no serviría para comunicar nada. Para que el lenguaje natural sirva a la física debe considerarse que el sujeto y el objeto son atributos de la acción, algo que da un contexto a la acción para que nos sea comprensible. Esto supone entender el concepto de *objeto* como equivalente a *capacidad de acción*. Físicamente un objeto es un conjunto de comportamientos posibles; de hecho toda teoría física estipula la existencia de objetos determinados: desde átomos y ondas hasta sistemas de coordenadas inerciales y supercuerdas.

Pero la relación entre acción y objeto puede ser circunstancial. Nuestra experiencia inmediata nos dice que una onda es una acción que se propaga sobre un medio material. Sin embargo la experiencia muestra la existencia de ondas electromagnéticas sin soporte material, sustantivo...En este caso (relevante caso) existe la acción pura por sí misma, sin necesidad de objeto...pero nuestro instinto gramatical nos dice: ¡el vacío (éter) es un objeto!... un objeto inmaterial...tenemos que explicar un conjunto de comportamientos atribuibles al vacío...necesitamos una teoría del vacío...o tal vez... ¡la onda se ha convertido en partícula!, pero sigue siendo onda para el electromagnetismo... o tal vez el vacío es dual: onda-partícula... La física actual tiene difícil reconciliación con el sentido común. Sin embargo no olvidemos que, incluso clásicamente, estamos habituado a concebir las ondas como objetos a los que atribuimos los comportamientos de reflexión, refracción, interferencia, difracción y polarización.

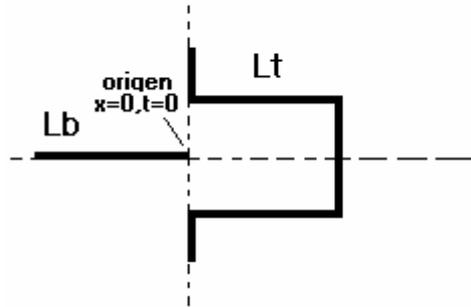
Es probable que, psicológicamente, el concepto de *objeto* esté asociado a la capacidad de control o manipulación; algo que originalmente depende de los sentidos del tacto y de la vista. Evolutivamente esta capacidad de manipulación está asociada al progreso tecnológico e intelectual en nuestra especie; el método científico sería el estado actual en cuanto a capacidad de manipulación del mundo físico.

“Allí donde el hombre no es capaz de ver ni es capaz de tocar, tampoco es capaz de pensar.” (F.Nietzsche)

9-PROBLEMAS Y CUESTIONES

Problema de la barra y el tubo.

Supongamos un tubo hueco y en reposo de tamaño en reposo L_t
 Supongamos una barra de tamaño en reposo $L_b > L_t$ que puede pasar a lo largo del eje del tubo.
 Supongamos que la barra alcanza una velocidad cercana a la de la luz. El observador solidario al tubo puede encontrar, a altas velocidades relativas y según la ec.



1.5, que hay un intervalo de tiempo en que la barra ha estado totalmente contenida en el tubo. En cambio para el observador solidario a la barra esta nunca ha estado totalmente contenida en el tubo.

Imagine ahora tubo está cerrado por un extremo y por el extremo abierto tiene una válvula que se pueden abrir y cerrar. Podemos pensar que el observador solidario al tubo puede manipularla para cerrarla cuando la barra esté totalmente contenida en el tubo... ¿Cómo ve el proceso el observador solidario a la barra?

Solución

El suceso origen $x=0, t=0$ es común al sistema de la barra y del tubo.

1-Sistema del tubo (barra móvil)

Suceso Choque: $(x, t) = (L_t, L_t / v)$

Coordenadas extremos barra

$$x_{1t}^b = L_t - L_b \beta ; \beta = \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$x_{2t}^b = L_b$$

Condición 1: La barra entra totalmente en el tubo si

$$x_{1t}^b = L_t - L_b \beta > 0$$

2-Sistema de la barra (tubo móvil)

Suceso Choque: $(x, t) = (0, L_t \beta / v)$

Coordenadas extremos barra

$$x_{1b}^b = -L_b$$

$$x_{2b}^b = 0$$

3-Sistema del tubo(barra móvil)

Suceso Cierre del tubo simultáneo al choque $(x, t) = (0, L_t / v)$

4-Sistema de la barra (tubo móvil)

Transformada de Lorentz del suceso anterior $(x, t) = (\frac{-L_t}{\beta}, \frac{L_t}{v\beta})$

(Esto es compatible con la Condición 1 : para el sistema de la barra

también esta entra totalmente en el tubo: $-\frac{L_t}{\beta} < -L_b$)

Intervalo de pérdida de simultaneidad en el sistema de la barra para la acción de cierre del tubo simultáneo al choque (simultaneidad en el sistema del tubo)

$$\Delta t = \frac{L_t}{v\beta} - \frac{L_t\beta}{v} = \frac{v/c^2}{\beta} L_t$$

Para el sistema de la barra(tubo móvil), no es posible que una señal recorra el espacio entre el punto de impacto $x=0$ y el extremo del tubo $x = -L_t / \beta$ en el intervalo de tiempo anterior :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{-L_t}{\frac{L_t}{\beta} v / c^2} = -c^2 / v$$

Esta velocidad supera en módulo la velocidad de la luz, lo cual no es posible si la señal del impacto se propaga en un medio material (tubo) y tiene carácter informativo. En realidad se ha calculado una velocidad media, pero si la velocidad media excede en modulo a c entonces (si $x(t)$ es una función continua) es seguro que existe al menos un intervalo de tiempo en que el modulo de la velocidad supera a c (Teorema de Roll del Análisis Matemático).

Mientras el extremo del tubo no reciba ningún impulso procedente del choque, mantendrá su estado de movimiento inercial. Para el observador solidario a la barra el extremo abierto del tubo acaba conteniendo a la barra por que el efecto del impacto no es capaz de llegar a dicho extremo en un tiempo menor que el necesario para “engullir” a la barra. En cambio para el observador solidario al tubo el proceso parece mas natural: simplemente la barra cabe dentro del tubo.

La respuesta a la pregunta ¿La barra acaba siendo absorbida por el tubo? es afirmativa en los dos casos y la explicación, aunque nos parece muy diferente un caso de otro, está dentro de los límites de la relatividad especial. En este ejemplo resulta clave para reconciliar a los dos observadores la imposibilidad de transmisión de la señal informativa del choque a velocidad superlumínica, de acuerdo con el principio 3.2.

Ejercicio para el lector: Comprobar que, en el sistema solidario al tubo, si el cierre del tubo se realiza en el mismo instante en que la barra entra en el tubo, entonces si el efecto del choque llegase en ese mismo instante necesitaría una velocidad media de

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} < -c^2 / v$$

que en módulo supera la velocidad de la luz.

El principio de relatividad exige que las leyes físicas no dependan de relaciones del tipo continente-contenido, ya que estas relaciones no tienen un carácter independiente del observador.

Osciladores y Ondas.

Retomemos el escenario de la relatividad especial con dos observadores inerciales en movimiento relativo uniforme. Imaginen que uno de ellos tiene un oscilador (sobre el eje "y") en reposo (sobre el eje "x") que emite ondas electromagnéticas a lo largo del eje "x". Según la mecánica cuántica[14] un oscilador local tiene unos niveles de energía bien definidos por la expresión

$$E = (n + \frac{1}{2})\hbar v$$

Por otra parte el periodo del oscilador se transforma como el de un reloj (ecuación 1.6), y el periodo de la onda así según 1.10. Estas expresiones son en general diferentes, por lo que la frecuencia del oscilador y la frecuencia de la onda emitida no coinciden para un observador en movimiento relativo a dicho oscilador.

Según la ley de Planck : $E=hv$, esto supone que la energía perdida por el oscilador no es igual a la energía de los fotones emitidos. ¿Qué pasa con la energía restante?

Discusión

Primero decir que la discrepancia entre la frecuencia de un oscilador en movimiento y la frecuencia de la onda que dicho oscilador emite es un fenómeno conocido en física clásica como efecto Doppler. El ejemplo típico es la sirena de la ambulancia que emite ondas sonoras que varían su frecuencia con el movimiento relativo al observador.

La ley de niveles de energía solamente es válida para las energías permitidas de un oscilador en reposo (oscilador local). Si el oscilador pierde energía y emite un fotón, entonces sufrirá también algún tipo de retroceso, lo cual supone una energía cinética absorbida por el oscilador.

Para que la ley de Planck sea aplicable en este caso el oscilador debe emitir energía sin que su movimiento se vea afectado. Para esto podemos imaginar el caso en que el observador en reposo ve que el oscilador emite simultáneamente dos fotones iguales y en sentidos contrarios. Para el

observador en reposo el retroceso sufrido por el oscilador se compensa y por tanto permanece en reposo.

¿Cómo ve el proceso el observador en movimiento relativo?

Si este observador suma la energía de los dos fotones emitidos en sentidos contrarios obtiene lo siguiente

$$\Delta E_-^{tot} = \hbar\omega_+ \sqrt{\frac{1 - \frac{v_+}{c}}{1 + \frac{v_+}{c}}} + \hbar\omega_+ \sqrt{\frac{1 - \frac{v_+}{c}}{1 + \frac{v_+}{-c}}} = \frac{2\hbar\omega_+}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta E_+^{tot}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Pero esto es lo que se deduce de las ecuaciones 2.0 aplicadas al oscilador. Es decir, para el observador en movimiento relativo la energía de los fotones también es igual a la energía perdida por el oscilador: por tanto no hay retroceso tampoco para el observador en movimiento; el oscilador no ve alterado su movimiento relativo.

Sin embargo resulta inmediato que, para el observador en movimiento, los impulsos de los fotones ($p=hk$) no cancelan.

$$\Delta P_- = \hbar k_+ \sqrt{\frac{1 - \frac{v_+}{c}}{1 + \frac{v_+}{c}}} - \hbar k_+ \sqrt{\frac{1 - \frac{v_+}{c}}{1 + \frac{v_+}{-c}}} = \frac{-2\frac{v}{c}\hbar k_+}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Este impulso no implica una modificación del movimiento del oscilador, por tanto es aplicable 2.2, lo que nos lleva a

$$\Delta P_- = \frac{-2\frac{v}{c}\hbar k_+}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta E_-}{c^2} v \Rightarrow \Delta E_- = \frac{-2\hbar\omega_+}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Lo que coincide con el cálculo anterior de energías.

Es decir, debemos asociar la alteración de impulso que percibe el observador en movimiento relativo al oscilador a una modificación de masa del oscilador. Así la modificación de masa es una explicación del caso válida para todos los observadores inerciales. En el caso general en que no se emitan 2 fotones iguales y en sentidos contrarios la equivalencia masa energía sigue siendo aplicable y hay que considerar que una parte de la masa del oscilador se ha perdido en la emisión de radiación.

Choque elástico de dos partículas.

Supongamos un choque de dos partículas de modo que se conserve la energía (E_0), el impulso (P_0) y la masa en reposo. Las variables sin primar son anteriores al choque y las primadas posteriores.

Energía e impulso de una partícula relativista

$$E^2 = (Pc)^2 + (mc^2)^2$$

$$\text{Conservación del impulso } \bar{P}'_1 + \bar{P}'_2 = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 = \bar{P}^0$$

$$\text{Conservación de la energía } E'_1 + E'_2 = E_1 + E_2 = \bar{E}^0$$

$$(\bar{P}_1 + \bar{P}_2)^2 = (\bar{P}'_1 + \bar{P}'_2)^2;$$

$$(\bar{P}_1)^2 + (\bar{P}_2)^2 + 2\bar{P}_1 \cdot \bar{P}_2 = (\bar{P}'_1)^2 + (\bar{P}'_2)^2 + 2\bar{P}'_1 \cdot \bar{P}'_2$$

Suponemos que el choque se produce en un instante. Elegimos como sistema de coordenadas uno en el que una de las partículas está, antes del choque, en reposo; $P_2 = 0$; $E_2 = m_2 c^2$ (basta aplicar las transformaciones de Energía e Impulso para obtener el caso general). Multiplicando por c^2 y desarrollando..

$$(\bar{P}_1 c)^2 = (\bar{P}'_1 c)^2 + (\bar{P}'_2 c)^2 + 2c^2 (\bar{P}^0 - \bar{P}'_2) \cdot \bar{P}'_2 =$$

$$(\bar{P}_1 c)^2 = (\bar{P}'_1 c)^2 - (\bar{P}'_2 c)^2 + 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$(E_1)^2 - (m_1 c^2)^2 = (E'_1)^2 - (m_1 c^2)^2 - (E'_2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$(E_1)^2 - (E'_1)^2 = -(E'_2)^2 + (m_2 c^2)^2 + 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$(E_1)^2 - (m_2 c^2)^2 - \{(E'_1)^2 - (E'_2)^2\} = 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$(E_1 - m_2 c^2)(E_1 + m_2 c^2) - \{(E'_1 + E'_2)(E'_1 - E'_2)\} = 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$E^0 \{(E_1 - E'_1) + (E'_2 - m_2 c^2)\} = 2c^2 \bar{P}^0 \cdot \bar{P}'_2$$

$$\Delta E = E'_2 - m_2 c^2 = -(E'_1 - E_1) = E_1 - E'_1$$

$$\Delta P = P'_2 - P_2 = -(P'_1 - P_1) = P_1 - P'_1$$

$$E^0 \Delta E = c^2 \bar{P}^0 \cdot \Delta \bar{P} \Leftrightarrow E^0 \Delta E - c^2 \bar{P}^0 \cdot \Delta \bar{P} = 0 \quad (3)$$

donde los incrementos de energía e impulso (ΔE , ΔP) son los que se ponen de manifiesto en la interacción: la energía e impulso que pierde una partícula es la que gana la otra. Puede el lector comprobar que la expresión (3) es invariante por las transformaciones (2). La relación anterior se puede interpretar en el espacio de Minkowsky (de energías e impulsos) diciendo que la interacción (el par ΔE , ΔP) es perpendicular al estado inicial (el par E_0 , P_0).

Discusión

La expresión anterior es válida en principio solamente para un intervalo finito de tiempo, para un antes y un después del choque. Planteemos sin embargo la tesis contraria: supongamos que la expresión anterior es válida de modo continuo, es decir, para diferenciales en vez de incrementos. Tenemos dos casos:

I-La acción es puramente acelerativa. Sustituyendo 2.1 tenemos

$$E^0 \bar{v} \bullet d\bar{P} = c^2 \bar{P}^0 \bullet d\bar{P} \Rightarrow \bar{P}^0 = \frac{E^0}{c^2} \bar{v}$$

expresión que es falsa en nuestro caso. La incompatibilidad se debe a que no es sostenible en relatividad que dos partículas intercambien energía y momento de forma instantánea. En física clásica la incompatibilidad se explica por no haber considerado la Energía Potencial asociada al *sistema* formado por las dos partículas. En un proceso elemental la energía se redistribuye entre las partículas, pero también parte va a un depósito común de energía potencial. De este modo pensar que la energía que pierde una partícula la gana la otra no es correcto. Sin embargo en física clásica se acepta que el impulso mecánico se intercambie de forma instantánea: esta es la 3ª ley de Newton; no se considera la existencia de un depósito de “impulso potencial”. Esta es la aproximación del muelle en los problemas de física elemental. La energía potencial no tiene impulso mecánico en física clásica; pero en relatividad toda energía posee inercia(**n- 18**). Por tanto el concepto clásico de energía potencial se aproxima al concepto relativista de energía en reposo y cabe preguntarse entonces como está distribuida esta energía en el espacio.

II-La acción supone una modificación de masa de las partículas. Aplicando 2.2 tenemos

$$E^0 dE = c^2 \bar{P}^0 \bullet \frac{dE}{c^2} \bar{v} \Rightarrow E^0 = \bar{P}^0 \bullet \bar{v}$$

expresión que, de nuevo, es incorrecta.

Con la expresión (3) y las aproximaciones adecuadas se puede deducir fácilmente la ecuación de difusión de la luz por electrones libres que se da en el *efecto Compton*. Este es un caso límite de aplicación ya que una de las partículas es un fotón, que no tiene masa en reposo. ¿Existe entonces una energía potencial entre el fotón y el electrón?. Parece que no existe tal cosa: un rayo de luz no se curva por efecto de un campo eléctrico. En cambio tenemos que aceptar la existencia de una zona espacio-temporal de discontinuidad asociada al “choque” entre el fotón y el electrón. Esta discontinuidad esencial de las acciones físicas limita la aplicación continua de la ley del choque y está descrita por el principio de incertidumbre de Heisenberg. La falta de continuidad de las acciones físicas supone que, a nivel microscópico, resulta difícil establecer el precedente y el consecuente de una determinada acción. En cambio, estadísticamente, las acciones acaban organizándose en promedio según la física macroscópica.

El efecto Compton se interpreta como evidencia de la existencia de electrones como entidades independientes, aún formando parte de objetos materiales. En el contexto de este artículo la interpretación sería que la radiación produce el colapso de *una* onda cuántica electrónica, no de varias.

Paradoja de los gemelos (*P.Langevin*)

Dos hermanos gemelos. Uno de ellos parte de viaje a una velocidad cercana a la de la luz hasta la estrella alfa-centauro e inmediatamente vuelve a la tierra. ¿Qué edad tienen los gemelos cuando vuelven a encontrarse?

Discusión

La palabra paradoja se refiere a lo poco intuitivo o “de sentido común” de la solución de este problema de acuerdo a la relatividad. Sin embargo, dentro de la relatividad, hay una forma no paradójica y otra “paradójica” de plantear la solución al problema.

Forma no paradójica:

Dividimos el viaje en dos tramos: ida y vuelta. Podemos suponer que cada tramo del viaje se realiza a velocidad relativa constante y despreciar los inicios y finales de trayecto, en que aparecen aceleraciones. Veamos si en estas condiciones llegamos a contradicción.

Pensemos en el reloj de pulsera del gemelo viajero. Para este reloj los sucesos A=“partida de la tierra”, B=“llegada a alfa-centauro” y C=“retorno a la tierra” están bien definidos y son sucesos locales, por tanto los tiempos t^{BA} y t^{CB} son tiempos locales para el gemelo viajero. Para el gemelo en la tierra estos tiempos se transforman como la relación de tiempos (1.3). Por tanto el gemelo en tierra ha envejecido mas en el proceso que el gemelo viajero.

Desde el punto de vista del gemelo en tierra, el reloj de pulsera del gemelo viajero es un reloj en movimiento y por tanto percibe que la marcha de este atrasa progresivamente respecto de su reloj de pulsera según la relación de tiempos 1.6'; exactamente lo mismo que en el caso anterior.

$$t_{nave}^{BA} = t_{tierra}^{BA} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Donde t_{tierra} es el tiempo medido por un reloj en reposo desde el sistema-base (gemelo en reposo) y t_{nave} es el tiempo medido por un reloj en reposo para el gemelo viajero (gemelo no inercial). La ecuación anterior supone que existe un reloj en alfa-centauro en reposo respecto de la tierra y sincronizado con los relojes en tierra. Por tanto, de nuevo, el gemelo en tierra ha envejecido mas en el proceso que el gemelo viajero.

Pensemos ahora en el reloj de pulsera del gemelo en tierra. Para el gemelo viajero es un reloj en movimiento y retrasa progresivamente respecto del suyo. ¿Cómo puede ser que el gemelo en tierra envejezca mas y que el reloj de dicho gemelo parece ir mas lento?. Detrás de esta pregunta se esconde la idea clásica del tiempo absoluto. Suponemos que *el tiempo* de los dos gemelos es comparable (mas o menos rápido); en el fondo suponemos que existe un tiempo absoluto de referencia. En relatividad hay que matizar mas la pregunta y acotar las acciones en el tiempo **y** en el espacio. Lo que en realidad puede determinar el gemelo viajero es lo que marca el reloj del gemelo en tierra *simultáneamente* a su llegada (del gemelo viajero) a alfa-centauro. La pérdida

de simultaneidad para el gemelo en tierra aumenta el tiempo de esta acción en justo lo necesario:

$$t^{BA}_{tierra} = t^{BA}_{nave} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{v(vt^{BA}_{nave})}{c^2} = \frac{t^{BA}_{nave}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Para el gemelo en tierra la llegada de la nave a alfa-centauro es posterior a la observación que el gemelo viajero hace de su (del gemelo en tierra) reloj; debido a esto el gemelo en tierra tiene que sumar un tiempo adicional a dicha observación. El lector puede estudiar el caso en que el gemelo en tierra observa su propio reloj simultáneamente a la llegada de su hermano a alfa-centauro. Para el gemelo viajero su llegada a alfa-centauro es anterior a la observación que el gemelo en tierra hace de su reloj terrestre y por tanto

$$t^{BA}_{nave} = t^{BA}_{tierra} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

De forma análoga, en el tramo de vuelta también juega un papel importante la simultaneidad en el cálculo de t^{CB} . La continuidad de la acción física requiere considerar como referencia para la vuelta un reloj en alfa-centauro (B) en reposo respecto de la tierra. Este aspecto de la continuidad aparece de forma natural si se representa este problema en el espacio de Minkowsky. Finalmente no hay paradoja: el gemelo en tierra es mas viejo cuando se produce el reencuentro.

Forma paradójica:

Si consideramos la acción AC completa, tenemos que t^{AC} es un tiempo local para los dos gemelos: Si los dos gemelos, un instante antes de re-encontrarse, transforman este intervalo según 1.6' llegarán a contradicción: Para los dos gemelos el reloj del otro ha atrasado respecto del propio.

Evidentemente esto es físicamente inconsistente; el estado de los relojes está perfectamente definido en la llegada. En el caso no paradójico hemos descompuesto el problema en dos partes, en cada una de las cuales se puede aproximar el movimiento del gemelo viajero utilizando una velocidad relativa uniforme; y por tanto es legítimo aplicar las transformaciones de Lorentz a cada una de estas partes. Por otra parte existe una asimetría básica en los sucesos considerados A y B: para un observador la medida del tiempo es local y para el otro no.

En el caso paradójico hemos aplicado las transformaciones de Lorentz a al movimiento completo, pero para ser coherentes con las transformaciones de Lorentz tendríamos que haber definido al menos una velocidad promedio uniforme del movimiento completo, la cual sería evidentemente nula ya que el punto inicial y final coinciden.

Relatividad y sistemas de coordenadas no inerciales

Problema de los cohetes espaciales: (J. Bell)

Tenemos dos cohetes iguales en reposo separados cierta distancia y unidos por un débil filamento recto. El filamento es tal que puede romperse si se alarga o acorta demasiado. En el sistema inercial base, en el instante $t=0$, arrancan los dos cohetes simultáneamente y siguen una trayectoria recta en la misma dirección del filamento, dirección que podemos considerar eje x . ¿Se rompe el filamento?

Discusión

Si las dos naves funcionan exactamente igual (son replicas gemelas), la velocidad $v(t)$ medida por el observador del sistema inercial base es la misma para las dos. Esto implica que la distancia entre las dos naves se mantiene constante durante todo el proceso.

Para aplicar la relatividad especial a este sistema acelerado pensemos en que la aceleración se imparte alternado fases de impulso acelerativo con fases inerciales. Las fases de impulso acelerativo duran hasta que el efecto de la aceleración se ha propagado a todos los puntos del sistema de coordenadas. Al final de dicha fase podemos utilizar la relatividad especial, es decir, los sistemas de coordenadas inerciales. Podemos aceptar que los periodos no inerciales duren un tiempo superior al de funcionamiento del motor de la nave, tal que sea suficiente para que los dos cohetes y el filamento vean eliminados los efectos propagación de impulso mecánico asociados a la aceleración. Si las dos naves tienen el mismo programa de funcionamiento de los motores los impulsos siempre van a ser simultáneos para el observador de la base. Durante el periodo inercial para los observadores en el cohete no existe movimiento relativo entre ellos. En efecto, la aplicación de la composición de velocidades para sistemas inerciales da

$$\frac{v + \delta}{1 + \frac{v\delta}{c^2}} = v$$

donde “ v ” es la velocidad común de las naves desde el sistema base y δ es la velocidad de una nave respecto de la otra. Esta relación solo tiene sentido si $\delta=0$. En cambio para el observador base no existe el efecto de la contracción de Lorentz del filamento. La distancia entre naves es constante en cualquier fase inercial para dicho observador base. Este observador puede pensar que, durante las fases no inerciales, se ha modificado el espacio entre las naves para un observador solidario al sistema de las naves. Además este efecto se anula en las fases inerciales. Sin embargo la condición de la velocidad relativa nula indica que el aumento de distancia no se debe a un movimiento relativo, sino a una modificación del espacio simultáneo. Esto se interpreta como una modificación en la métrica en el sistema de coordenadas acelerado. Esta modificación es tal que la contracción de Lorentz resulta cancelada para el observador base inercial. Por tanto el espacio simultáneo entre naves se transforma según la relación

$$L'_0(t) = \beta^{-1} L_0 = \frac{L_0}{\sqrt{1 - \frac{v(t)^2}{c^2}}}$$

Donde L_0 es la distancia inicial entre naves, es decir, la distancia que para el observador base existe entre las naves en todo momento y L'_0 es la distancia entre naves para el observador situado en el sistema *no inercial* de las naves.

Note el lector el efecto radical de la aceleración: el comportamiento descrito es válido aún para aceleraciones muy pequeñas siempre que los cohetes se muevan con la misma aceleración. Recuerde también la propiedad del campo gravitatorio: localmente todos los cuerpos caen con la misma aceleración (Galileo). En este ejemplo vemos que el espacio es “flexible”, “compresible” y “expansible”; “acumulable” y “dispersable”. Según J. Bell el filamento acaba rompiéndose. Por otra parte, imagine el caso extremo en que la distancia entre cohetes es inicialmente nula, entonces las naves no se separan para ningún observador. Esta situación implica que tenemos que definir un sistema de coordenadas utilizando reglas, o segmentos rígidos que mantienen *contacto* permanente; es decir, existe una fuerza de ligadura entre ellas.

La barra y la esfera

Se trata de una ampliación del problema de la barra y el tubo. Tenemos una superficie esférica hueca con una abertura de entrada. La longitud de la barra en reposo puede ser mucho mayor que el diámetro de la esfera. Desde el sistema de la esfera, si la velocidad relativa de la barra es suficientemente alta esta puede entrar y moverse (si posee la *propulsión adecuada*) dentro en una trayectoria circular centrada en el centro de la esfera. ¿Cómo ve el proceso el observador de la barra?

Discusión

En el planteamiento se presume que un segmento rígido sometido a aceleración también se ve afectado por la contracción de Lorentz[2]. Si esto es así, entonces para el observador de la esfera el movimiento de la barra será como muestra la imagen correspondiente. Si la barra está sometida a aceleración el observador de la barra va a ser no inercial. Para percibir el punto de vista de este observador recurrimos a un sistema de coordenadas inercial instantáneamente en reposo respecto del observador en la barra. Para dicho observador la barra estará sometida a una flexión. Si la barra no es lo bastante flexible se romperá.



Transformaciones de coordenadas y campo gravitatorio.

Las transformaciones de coordenadas más generales $x - (x_+, t_+)$; $t - (x_+, t_+)$ se plantean en forma diferencial y tienen matemáticamente esta forma

$$dx_-^s = \left(\frac{\delta x_-^s}{\delta x_+} \right)_{t_+ cte} dx_+ + \left(\frac{\delta x_-^s}{\delta t_+} \right)_{x_+ cte} dt_+$$

$$dt_-^l = \left(\frac{\delta t_-^l}{\delta x_+} \right)_{t_+ cte} dx_+ + \left(\frac{\delta t_-^l}{\delta t_+} \right)_{x_+ cte} dt_+$$

Tomando como base la transformación de Lorentz los coeficientes diferenciales tienen la siguiente interpretación física

$$\left(\frac{\delta x_-^s}{\delta x_+} \right)_{t_+ cte} = \left(\frac{\delta x_-^s}{\delta x_+^s} \right) = \beta^{-1}$$

La restricción de la derivada parcial es t_+ constante, lo cual significa que dx_+ es un espacio simultáneo. El coeficiente es una relación entre espacios simultáneos. Partimos un segmento en reposo “ dx .” Para “+” este segmento está en movimiento. Este coeficiente representa la contracción de Lorentz.

$$\left(\frac{\delta t_-^l}{\delta t_+} \right)_{x_+ cte} = \left(\frac{\delta t_-^l}{\delta t_+^l} \right) = \beta^{-1}$$

La restricción de la derivada parcial es x_+ constante, lo cual significa que dt_+ es un tiempo local. Partimos de un reloj (t_-) en reposo. Para “+” este reloj está en movimiento. El coeficiente corresponde con la dilatación temporal.

Podemos identificar el resto de los coeficientes así

$$\left(\frac{\delta x_-^s}{\delta t_+^l} \right) = -v\beta^{-1} ; \left(\frac{\delta t_-^l}{\delta x_+^s} \right) = -\frac{v}{c^2} \beta^{-1}$$

donde vemos que dependen directamente de la velocidad relativa.

Estos son los coeficientes de transformación entre sistemas de coordenadas inerciales y vemos que se calculan a partir de medidas con reglas rígidas y relojes locales en distintos sistemas de coordenadas.

Para el caso de sistemas de coordenadas no inerciales la cosa cambia profundamente. Recordemos que el inicio de la relatividad se basa en una redefinición de la coordenada tiempo para los sistemas de coordenadas inerciales. Resulta un esfuerzo inútil hacer tal cosa para los sistemas de coordenadas no inerciales ya que para estos sistemas la velocidad de la luz no es constante. No tenemos una definición sencilla de tiempo para cualquier sistema de coordenadas.

Es probable que el lector haya utilizado el autobús; que al intentar llegar a los asientos del fondo el autobús haya empezado a acelerar. Esto produce una “fuerza” que parece tirar hacia atrás. Personalmente me sorprende esta sensación por que parece ser muy profunda, no afecta solo a los pies, sino a todo el cuerpo. Realmente parece tratarse de un campo de fuerzas lo que está actuando. Según Einstein esta percepción física es correcta y realmente el observador acelerado del autobús puede pensar que está en reposo y actúa un campo de tipo gravitatorio. El carácter gravitatorio de este campo depende de la conocida propiedad de inducir la misma aceleración a toda entidad física. Una consideración de este tipo está en el origen de la relatividad general.[2]

Introducción elemental de la métrica de Swarzschild (relatividad general)

Razonando sobre experiencias como la del autobús, Einstein intuyó que era posible expresar las *leyes físicas* sin que estas hiciesen referencia a ninguna forma de movimiento *absoluto*, ya sea velocidad o aceleración. Un sistema de coordenadas acelerado se puede describir como un sistema en reposo en el que actúa un campo gravitatorio; y al revés, un campo gravitatorio puede describirse (localmente) como un sistema de coordenadas acelerado. Einstein resumió estas ideas en el principio de equivalencia entre inercia y gravedad[2].

En lo que sigue consideraremos como *leyes físicas* la contracción de Lorentz y la dilatación temporal para reglas y relojes rígidos tal como se han presentado anteriormente; es decir, dependiendo de la velocidad relativa entre observadores. También se utilizará la conocida propiedad del campo gravitatorio de acelerar, relativamente a un observador gravitatorio, igualmente todos los entes físicos.

Imagine el lector una masa con simetría esférica, que no gira y dos observadores libres del campo gravitatorio separados significativamente: en caída libre desde el infinito a lo largo de una línea que llega al centro de simetría. Fijémonos en el suceso de referencia definido por la coincidencia espacio-temporal de cada observador en caída libre y un observador correspondiente en reposo instantáneo en el campo gravitatorio (observador gravitatorio). Consideremos un reloj en reposo para el observador en caída libre. Para el observador en gravitatorio es un reloj en movimiento en un sistema de coordenadas acelerado, por tanto para un pequeño entorno del suceso de referencia, la marcha del reloj libre evaluada por el observador gravitatorio cumple

$$dt^l_L = dt^l_G \beta$$

esto relaciona un intervalo de tiempo local para los dos observadores, donde el tiempo gravitatorio es el que marca un reloj *en reposo* en el campo gravitatorio y el tiempo libre el de un reloj en caída libre que coincide instantáneamente con el reloj gravitatorio.

Consideremos dos puntos separados dx en la dirección de caída libre y en reposo para el observador libre. Para el observador gravitatorio correspondiente estos dos puntos se mueven con la misma aceleración (Principio de equivalencia) de forma similar al problema de los dos cohetes, por tanto para un pequeño entorno del suceso de referencia, evaluado por el observador gravitatorio se cumple:

$$dx^s_L = dx^s_G \beta^{-1}$$

Consideremos un proceso físico local cualquiera en el laboratorio del observador en caída libre. Para este observador el proceso no está afectado por el campo gravitatorio ni por fuerzas acelerativas; por tanto las medidas de espacio y tiempo asociadas a este proceso serán las mismas en cualquier punto de la trayectoria de caída. Esto nos permite relacionar las reglas y relojes de los dos observadores gravitatorios

$$dt^l_L = dt^l_G \beta = dt^l_{G^\infty} ; \beta(\infty) = 1$$

$$dx^s_L = dx^s_G \beta^{-1} = dx^s_{G^\infty}$$

Donde los subíndices G se refieren a observadores en reposo en el campo gravitatorio, observadores que sienten el campo gravitatorio. El subíndice infinito se refiere a un observador gravitatorio muy alejado de la masa central. Utilizando la aproximación de la mecánica de Newton para la velocidad de caída libre tenemos

$$dt^l_{G\infty} = dt^l_G \sqrt{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}}; \quad dr^s_{G\infty} = \frac{dr^s_G}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}}} \quad (1)$$

Es decir, tenemos una relación entre los relojes y reglas (el tiempo y el espacio) de un observador gravitatorio muy alejado (infinito) y un observador gravitatorio relativamente próximo a la masa central; ambos en reposo relativo recíproco. Podemos identificar los coeficientes de la transformación de coordenadas correspondiente

$$\frac{\delta t^l_{G\infty}}{\delta t^l_G} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}}; \quad \frac{\delta r^s_{G\infty}}{\delta r^s_G} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}}}$$

$$\frac{\delta t^l_{G\infty}}{\delta r^s_G} = \frac{\delta r^s_{G\infty}}{\delta t^l_G} = 0$$

Esto representa una transformación de coordenadas entre un sistema de coordenadas inercial y uno no inercial. Los términos nulos se justifican por el reposo relativo entre los dos observadores gravitatorios. Estas relaciones generan el elemento de línea de Minkowsky siguiente:

$$dr_{G\infty}^2 - c^2 dt_{G\infty}^2 = ds^2 = \frac{dr_G^2}{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}} - c^2 dt_G^2 \left(1 - \frac{2GM}{r_G c^2}\right)$$

con lo que obtenemos el invariante ds en coordenadas gravitatorias. Los sucesos asociados a un rayo de luz moviéndose libremente en la dirección r , se caracterizan por $ds=0$, con lo cual la velocidad de la luz en coordenadas gravitatorias, es menor que en coordenadas inerciales:

$$\frac{dr_G}{dt_G} = c \left(1 - \frac{2GM}{r_G c^2}\right)$$

Recordemos la importancia de la “velocidad” de la luz; el observador gravitatorio puede medir los efectos de las relaciones anteriores y ser consciente, con argumentos experimentales, de que su sistema de coordenadas es no-inercial:

1-Curvatura de la luz al pasar cerca de cuerpos muy masivos como el sol.

2-Si aplicamos la invarianza de la fase para una onda libre moviéndose en la dirección r

$$w_{G\infty} \Delta t - k_{G\infty} \Delta r = w_{G\infty} \Delta t_G \beta - k_{G\infty} \Delta r_G \beta^{-1} = w_G \Delta t_G - k_G \Delta r_G$$

$$\Rightarrow w_G = w_{G\infty} \sqrt{1 - \frac{2GM}{r_G c^2}}$$

obtenemos el efecto de desplazamiento al rojo en un campo gravitatorio. La frecuencia de un proceso periódico que se desarrolle sin ser afectado por un campo gravitatorio es mayor que la frecuencia del mismo proceso afectado por

un campo gravitatorio. Debido a esto un reloj en un satélite geoestacionario marcha mas deprisa que uno en la superficie de la tierra. Si el satélite no es geoestacionario hay que añadir el efecto de la velocidad relativa que tiende a retardar el ritmo de reloj del satélite respecto al de la superficie terrestre. El funcionamiento normal del sistema GPS requiere una resincronización periódica de los relojes de los satélites respecto de los relojes en tierra, de acuerdo con la relatividad.

Utilizando todas las coordenadas gravitatorias el elemento de línea es **(n-20)**

$$ds^2 = r^2 d\phi^2 + r^2 \text{sen}^2(\phi) d\theta^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{rc^2}} - c^2 dt^2 \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) \quad (\text{Schwarzschild})$$

dado que las componentes perpendiculares al movimiento de caída libre no resultan alteradas.

La presentación hecha de la métrica de Schwarzschild es intuitiva, pero de ningún modo rigurosa. La única legitimidad de esta métrica es que satisface las ecuaciones de campo de la relatividad general para un campo gravitatorio central que no gira. Es esta base la que permite interpretar (1) diciendo que dos relojes situados a distinto potencial gravitatorio siguen un ritmo diferente.

En la relatividad especial hablamos de espacio-tiempo plano e isótropo; en cambio para un observador gravitatorio dado sí tiene *sentido físico* decir que, en su propio sistema de coordenadas, el espacio-tiempo está deformado y es anisótropo. Finalmente note el lector que la causa directa de esta anisotropía es la propiedad del campo gravitatorio de acelerar por igual todos los entes físicos.

Se propone al lector continuar esta exposición con la referencia [13].

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. En este caso sí hay unas fuentes asociadas a la onda.

n-2:Este principio es necesario ya que las coordenadas inerciales se definen a partir de la medida de espacios y tiempos utilizando reglas y relojes en reposo relativo para el observador inercial.

Evidentemente la luz en el vacío es una excepción a este principio y no puede definirse un sistema de coordenadas inercial asociado a un rayo de luz.

El análisis de las propiedades cinemáticas de las ondas implica que es posible el reposo relativo entre una onda y un sistema de coordenadas inercial. Este análisis cinemático de las ondas es lo que se conoce como efecto Doppler.

Un sistema de referencia ligado a la superficie de la tierra, en intervalos de tiempo relativamente pequeños (horas), se puede considerar prácticamente un sistema de coordenadas inercial.

n-3: Esta es una primera condición de simetría basada en el criterio de sencillez. 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-5': Considere el lector que la longitud de una regla en movimiento se determina estableciendo las coordenadas de los dos extremos simultáneamente (espacio simultáneo). Para medir la longitud de un objeto en movimiento hace falta una regla y dos relojes en reposo sincronizados.

El concepto de espacio simultáneo implica la existencia de un conjunto de partes materiales en reposo relativo entre si, al menos para algún sistema de coordenadas inercial. Esto equivale a la idea de sólido rígido como es el caso de las marcas de la regla. El concepto de tiempo local supone la existencia de un objeto que pasa o se manifiesta regularmente en un mismo punto.

n-6:*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: *Espacio y 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. Una partícula (un punto físico) tiene velocidad y

covelocidad instantáneas. La hipótesis de una estructura interna de las partículas es el punto de partida de la teoría de cuerdas.

Resumo la idea de movimiento relativo así:

Velocidad: relación entre el espacio inducido por el movimiento relativo y el tiempo real medido por un reloj en reposo.

Covelocidad: relación entre el tiempo inducido por el movimiento relativo y el espacio real asociado a las dimensiones de un objeto en reposo.

Este artículo plantea un cambio en la idea de movimiento. Aparecen dos componentes del movimiento: la primera es la intuitiva que ya conocemos, la segunda es la covelocidad. Aunque la covelocidad está asociada a la velocidad no es un concepto intuitivo. Einstein mantuvo explícitamente solo el primer concepto de movimiento, aunque en realidad también acepta el otro: el desplazamiento relativo en el tiempo. El problema clásico de los gemelos aborda esta propiedad del movimiento relativo. El concepto intuitivo de movimiento es muy querido para los físicos por razones de peso:

1- Por nuestra evolución biológica prestamos mas atención a los objetos en movimiento que a los fijos. Nuestra experiencia física es rica en lo relativo al movimiento, incluyendo predicción o intuición del movimiento en muchos casos.

2- La 2ª ley de Newton permite deducir fuerzas a partir de una correcta utilización de nuestra intuición del movimiento y al revés.

Es posible potenciar una capacidad natural del ser humano. Este debería ser el enfoque educativo para la mecánica clásica, y pasa por un planteamiento mas intuitivo en la presentación de la cinemática del sólido rígido.

n-7: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 qué foco proviene.

n-8: Las expresiones 2.0 introducen la energía y el impulso mecánico con independencia del concepto de masa. Estas expresiones presentan cierta asimetría. Se acepta que existe la combinación de energía no nula e Impulso nulo; según la equivalencia masa-energía es lo que se denomina masa o energía en reposo. Sin embargo la asociación Impulso no nulo y energía nula parece no existir. No existe ningún sistema de referencia inercial en que la energía de una partícula sea nula.

Análogamente a las transformaciones de Lorentz, según 2.0 existe energía e impulso inducidos por el movimiento relativo.

n-9:Este caso excluye la radiación de una carga acelerada por la gravedad.

n-10: Según Heisemberg 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.

Analogías con la Termodinámica:

1-La ecuación 2.2 recuerda el primer principio de la Termodinámica: parece faltar un término calorífico que hace de la energía una diferencial exacta.

2-El colapso cuántico es una acción *básicamente irreversible*: si un electrón libre emite un fotón, se produce un cambio de estado cuántico impredecible; si volviese a absorber el “mismo” fotón el cambio de estado cuántico sería igualmente impredecible. De forma análoga a la mecánica estadística, la reversibilidad es una cuestión probable, no determinista; la diferencia estriba en que la probabilidad se asocia ahora a entidades elementales, no a poblaciones de átomos.

n-11: 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.

Cuestión: Si la gravedad se comportase como una interacción debería provocar también el colapso de la onda cuántica, lo que introduciría una pérdida de coherencia en experiencias como la de las dos rendijas. Parece que esto no ha sido observado. ¿Por qué?.

Note el lector que, para la teoría general de la relatividad, la gravedad no es una interacción, un “intercambio” de acciones; sino que tiene relación directa con la geometría del espacio-tiempo.

n-12: *La unidad es la variedad, y la variedad en la unidad es la ley suprema del universo.* (Isaac Newton). La idea de Universo como unión profunda del todo es de origen religioso.

n-13: 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]. El punto de vista de Lorentz sobre este experimento es que el éter existe, pero le atribuye acciones dinámicas sobre la materia que hace que sea indetectable: la contracción de reglas y la dilatación del ritmo de relojes móviles. Poincaré señaló en una conferencia (Septiembre 1904) que atribuir estas acciones al éter, de la forma que lo hace Lorentz, es insostenible.

n-14: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) .

Conceptualmente, en el espacio de Minkowski no tienen sentido las ideas de espacio y tiempo independientemente una de la otra, de la misma forma que las coordenadas cartesianas no tienen sentido por separado; esto es precisamente lo que significa el prefijo “co” del término “co-ordenadas”. La existencia de un universo físico con 3 dimensiones espaciales y 1 temporal supone que los conceptos fundamentales con sentido físico son los de *espacio simultáneo*, *tiempo local*, y otros similares que suponen una unión intrínseca de las ideas habituales de espacio y tiempo. Tal vez sea esta la lección mas importante de la teoría de la relatividad: no pensemos ya en términos de *espacio y tiempo*, sino en nuevos términos tales como *espacio simultáneo*, *tiempo local y fase de una onda*. Solo de esta forma la relatividad puede ser herramienta para resolver problemas y paradojas. El tradicional espacio euclídeo tridimensional debe asociarse al concepto de espacio simultáneo. Un concepto importante es el elemento de línea de Minkowsky: $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, magnitud invariante en coordenadas inerciales que juega un papel similar a la distancia en el espacio Euclídeo tridimensional.

n-15: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 (experimento de Pound-Rebka). 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, al menos en el margen de nuestra experiencia, que las líneas coordenadas cartesianas x, y, z estén hechos de algún material rígido e indeformable. ¿Qué significa una línea

coordenada temporal rígida?: una línea coordenada temporal rígida 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: un rayo de luz curva su trayectoria en un campo gravitatorio[2].

n-16: La relatividad especial no es aplicable, en general, a sistemas de coordenadas acelerados; esto no quiere decir que no se puedan estudiar movimientos acelerados con la relatividad especial. Para un sistema de coordenadas inercial, el concepto de velocidad instantánea de una partícula se supone válido y de acuerdo con la ley de composición de velocidades 1.9.

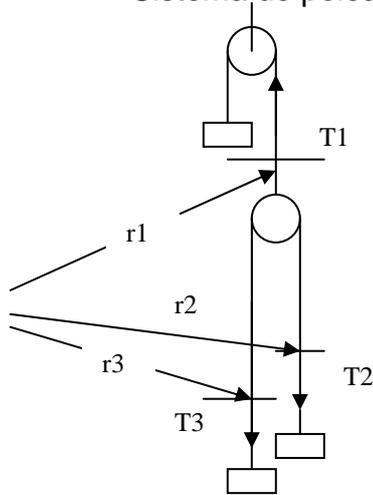
n-17: Se puede pensar en una alternativa en que la señal rebota en algún tipo de espejo y vuelve al foco emisor. En este caso podríamos medir la velocidad de la señal empleando un solo reloj y la distancia al espejo. Sin embargo parece que tendríamos que aceptar esto: Si la velocidad de ida de la señal es \mathbf{s} , la velocidad de vuelta del espejo es $-\mathbf{s}$; y esto para todas las direcciones posibles. Esto es equivalente a las propiedades de isotropía que se presentan mas adelante. Este es, según Einstein[1], parte del conocimiento que se necesita; considerando además que la señal adecuada es la luz y \mathbf{c} es una constante física.

n-18: Hay que matizar mas este punto en lo tocante a la física clásica: La transmisión instantánea de impulso asociada al tercer principio puede ser una aproximación muy aceptable si el mecanismo de transferencia se basa en un medio material continuo en el que cada punto material interacciona solo con su vecino "infinitamente" próximo. Es el caso de las ondas mecánicas. Sin embargo a escalas atómicas la interacción no se basa en la existencia de un medio mecánico; sino que el concepto relevante es el de campo. Se pierde así la referencia a un medio mecánico.

Fijémonos en las aproximaciones habituales en los problemas elementales de mecánica : la cuerda "sin masa", la polea "sin masa" y el muelle "sin masa". En todos los casos esta aproximación equivale a una transmisión instantánea del impulso mecánico entre los objetos conectados por la cuerda, la polea o el muelle. En cuanto a la energía, la cuerda sin masa y la polea sin masa no pueden absorber energía, pero el muelle sin masa si puede hacerlo en forma de Energía Potencial. De este modo la energía potencial aparece relacionada con una aproximación quasiestacionaria de la dinámica de un sistema mecánico. En esta aproximación clásica se eluden los estados intermedios del sistema asociados a la propagación a velocidad finita del impulso mecánico y la energía. Esta aproximación es correcta en la medida en que estos estados intermedios evolucionen y se establecen en tiempos mucho menores que el movimiento de las partes del sistema. Pero dado que existe un límite de velocidad \mathbf{c} , los sistemas con partículas veloces (próximas a \mathbf{c}) pueden evolucionar en tiempos comparables a los de propagación del impulso y la energía mecánica y por tanto la aproximación clásica ya no es aplicable.

Ejemplos de problemas clásicos con transmisión instantánea de impulso y energía.

Sistema de poleas y cuerdas "sin masa".



A través del subsistema marcado con límites solidarios a las cuerdas tenemos:

Transmisión instantánea del impulso:

$$\bar{T}_1 + \bar{T}_2 + \bar{T}_3 = 0$$

Transmisión instantánea de energía:

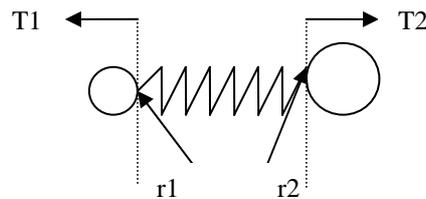
$$\bar{T}_1 \cdot d\bar{r}_1 + \bar{T}_2 \cdot d\bar{r}_2 + \bar{T}_3 \cdot d\bar{r}_3 = 0$$

Considerando también la condición de longitud constante de la cuerda de abajo

$$d(\bar{r}_2 - \bar{r}_1) = -d(\bar{r}_3 - \bar{r}_1)$$

se deduce que $T_2 = T_3$: no hay pérdida de tensión.

Muelle « sin masa » conectando dos cuerpos. También se ha señalado el límite del subsistema-muelle como marcas punteadas solidarias al los extremos del muelle



Transmisión instantánea del impulso a través del muelle

$$\bar{T}_1 + \bar{T}_2 = 0; \quad T = k(L - L_0)$$

Transmisión instantánea de energía en el muelle con acumulación de energía potencial

$$\bar{T}_1 \cdot d\bar{r}_1 + \bar{T}_2 \cdot d\bar{r}_2 = \bar{T}_1 \cdot d(\bar{r}_1 - \bar{r}_2) = dE_p = d\left\{\frac{1}{2}k(L - L_0)^2\right\}$$

Note el lector que en los dos ejemplos se sustituye la ecuación de flujo de impulso en la ecuación de flujo de energía. Esto hace que debamos considerar también instantánea la transmisión de energía.

La aproximación cuasiestacionaria, aplicada a grandes o pequeñas escalas, es la marca distintiva de la física clásica. Asociada a esta aproximación está la consideración de la energía y el impulso como conceptos independientes, mientras que en relatividad estos conceptos van unidos intrínsecamente y están sometidos a procesos de propagación a velocidad finita.

Tomemos el ejemplo elemental de la compresión de gas por medio de un mecanismo de émbolo. Existe un mecanismo de propagación de las variaciones de presión en el gas; las ondas sonoras son ejemplo de esto. Pero si, en el caso considerado, la propagación de las alteraciones de presión en el gas y la consiguiente estabilización de dicha presión es significativamente más rápida que el movimiento del émbolo; entonces podemos considerar que el gas va adoptando distintos estados de equilibrio caracterizados por una presión y

una temperatura bien definidas en todo el proceso. Este es un ejemplo de un principio básico de la termodinámica: No importa como se desarrolle un proceso real en un sistema físico, siempre se podrá desarrollar lo bastante lento como para considerar que los estados que recorre el sistema en todo el proceso son aproximadamente de equilibrio termodinámico. De esta forma se elude en Termodinámica Clásica los mecanismos de propagación del impulso mecánico y la energía. Esta aproximación puede estar muy cercana a la realidad si estos mecanismos son suficientemente rápidos. La forma clásica por excelencia de conseguir esto es considerar sistemas físicos de dimensiones “elementales” de modo que los mecanismos de propagación actúen con rapidez suficiente en dichos “elementos”. Esta aproximación lleva a utilizar el cálculo diferencial, extendiendo así los principios de la mecánica a escalas infinitesimales de espacio y tiempo.

La Electricidad y el Magnetismo antes de F araday y Maxwell son otro ejemplo de esta aproximación clásica. De hecho F araday siempre se opuso a la mecánica de Newton por permitir la propagación instantánea de las acciones físicas; sin embargo esta aproximación, considerada con las debidas precauciones, es excelente en un área que abarca gran parte de la experiencia humana común.

En los ejemplos presentados las acciones instantáneas aparecen por no considerar la masa; es decir, todo retardo de transmisión requiere un medio material en mecánica clásica. La idea de propagación de la luz en el vacío queda muy lejos de la mecánica clásica.

Los ejemplos anteriores, y la propia experiencia del autor, indican que los conceptos de flujo de energía y flujo de cantidad de movimiento son fundamentales para resolver problemas de mecánica a partir de las leyes fundamentales. Sin embargo este concepto no suele ser objeto de enseñanza por posibles causas:

1-La característica de interacción instantánea propia de la mecánica clásica hace difícil introducir el concepto de flujo desde la enseñanza básica, de modo que es difícil enseñar un “método directo” de resolución de problemas.

2-En niveles de aprendizaje superiores se enseñan los métodos analíticos de Lagrange y Hamilton, que eliminan por completo el concepto de flujo de energía e impulso. Por esta razón estos métodos parecen de aplicación mas sencilla que el “método directo” y se les atribuye mas “verdad”, aunque creo que la realidad es que el “método directo” no se enseña correctamente.

n-19: En la cinemática clásica tenemos el problema de la relación entre la medida de la velocidad de un cuerpo en dos sistemas de coordenadas que est n en movimiento relativo arbitrario; incluyendo desplazamiento y giro. El análisis clásico de este problema incluye una hipótesis que a veces no se hace explícita: que es posible hacer coincidir completamente (hasta la identidad) en un instante determinado los ejes coordenados del sistema móvil con los ejes coordenados de un sistema en reposo y que la métrica de los dos sistemas es la euclídea.

n-20: Esta métrica deja de tener sentido para radios menores que $2GM/c^2$, (agujero negro). Una alternativa señalada por algunos autores es que el supuesto básico de observadores gravitatorios en reposo relativo deje de tener sentido para campos gravitatorios muy intensos.

10-EPILOGO

En la física actual aparecen de forma patente las relaciones dialécticas materia-vacío e información-incertidumbre. Según Hegel la superación de estas dicotomías requiere un nuevo proceso de Síntesis; es decir, nosotros somos también parte del problema. "El conocimiento actual, mas que consistir en un camino hacia la verdad, se ha convertido en un acceso costoso a lo desconocido." (Fernando Colina)

11-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:Electrodinámica Clásica. 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.Kittl: Deducción Elemental de la Estructura Fina del Espectro del Hidrógeno.
Ciencia Abierta Vol 18: <http://cabierta.uchile.cl/revista/18/educacion/edu10/>
- [8]R.Penrose: La Nueva Mente del Emperador. Ed. Mondadori. *Capítulos 5 y 6.*
- [9]Igor Saavedra : El tiempo en la física:
<http://www.uchile.cl/publicaciones/anales/9/doc2.html>
- Xabier Zubiri sobre el tiempo:
<http://www.zubiri.org/works/spanishworks/Conceptodescrip.htm>
- [10] M. Arndt y A. Zeilinger: Probing the limits of the quantum world.
Revista Physics World: Mayo 2005: <http://physicsweb.org/articles/world/18/3/5/1>
- [11]Sixto Ríos: Modelización. Alianza Editorial-1995.
- [12]Gilles Cohen-Tannoudji. Michel Spiro: La materia-espacio-tiempo. Espasa Universidad 1988.
- [13] P.Kittl , G.Díaz. Teoría Elemental de la Gravitación y de los Agujeros Negros.
Ciencia Abierta Vol. 27: <http://cabierta.uchile.cl/revista/27/articulos/pdf/edu3.pdf>
- [14]Dicke-Wittke: Introducción a la mecánica cuántica. Edit Librería General.1960.

Autor: ENRIQUE CANTERA DEL RÍO. Lcdo. en Cª Físicas e I.T Telecomunicaciones.

12-BREVE APUNTE SOBRE EL CONCEPTO DE INERCIA Y LA MECÁNICA CUÁNTICA

1-INTRODUCCION

Un campo matemático es una función de varias variables: $f(x,y,z,t)$; sin embargo hay un matiz: (x,y,z,t) no representa un punto de la mecánica. Ahora x,y,z,t es simplemente un punto de nuestro sistema de coordenadas. No consideramos el movimiento de este punto, sino la propagación de la señal representada por “f”. En el problema clásico de la cuerda tensa, la forma de la cuerda es una función $y=f(x,t)$. Esto no es un campo ya que f representa el movimiento de los puntos que forman la cuerda. Esta ecuación se puede poner como $F(x,y,t) = 0$; lo cual da el movimiento de cada punto “x” si suponemos que este movimiento es unidimensional en “y”.

Un campo es una zona del espacio en la que se manifiesta una determinada propiedad física: la fuerza eléctrica, la gravedad, etc..con independencia, en principio, de si existe un soporte mecánico para ella.

El planteamiento de las leyes físicas utilizando el concepto de campo marca un punto de inflexión muy sutil en la historia de la física. Inicialmente tenemos la partícula mecánica, que es útil en base a la identidad que proporciona a cualquier forma de movimiento. Se piensa que cualquier movimiento de la naturaleza se basa en el movimiento de las partículas que estructuran la materia. El campo no proporciona de por si ninguna identidad a las partículas en que pueda sustentarse la propiedad física que describe, solamente expresa que en un punto del espacio y del tiempo ha ocurrido algún suceso medible. En el caso del campo lo relevante es el movimiento del propio espacio; es decir, si el espacio que se utiliza es inercial o no y como afecta esto a las *leyes del campo*. Esto queda solucionado automáticamente si se supone que hay un fundamento mecánico de estas leyes que se expresan por medio del objeto matemático campo. Eso es lo que hace Euler con las leyes hidrodinámicas utilizando el campo de velocidades de un fluido: $v=f(x,y,z,t)$ y las leyes de Newton para una partícula. Las leyes del campo tratan de relacionar el comportamiento $f(x,y,z,t)$ con el comportamiento $f(x+dx, y+dy, z+dz, t+dt)$. De esta forma se introduce la causalidad: el campo describe una serie de sucesos $f(x,y,z,t)$ que están relacionados causalmente.

En relatividad el concepto de campo electromagnético debe considerarse como fundamental, sin base mecánica. El campo ya no es simplemente una forma conveniente de plantear las leyes físicas. Hay leyes que no se pueden plantear sin este concepto, ya que la ausencia de base mecánica pasa a ser idea fundamental. De este modo el problema para el electromagnetismo es el inverso al caso clásico: ¿Qué papel juega la inercia en las leyes del campo?. En el planteamiento clásico este problema quedaba saldado directamente por la utilización de las leyes mecánicas para establecer las leyes (ecuaciones diferenciales) del campo, pero en el electromagnetismo y en general en la física ¿existe una formulación única de la idea de inercia?. Suponemos que la fuerza de Lorentz viene a llenar este vacío del electromagnetismo; pero ¿existe un concepto puramente cuántico de inercia o masa inercial?. El concepto de masa clásico no es directamente utilizable en física cuántica. No se puede definir la masa como la proporción entre la fuerza aplicada y la aceleración resultante en una partícula, ya que estos conceptos son incompatibles en una experiencia física bien definida según el principio de indeterminación de Heisenberg. En cambio es mas acorde con la física cuántica definir la masa según el principio de equivalencia masa-energía como el contenido de energía de una partícula. Consecuentemente la inercia de una partícula es la oposición a la modificación de su energía, y esto incluye la energía en reposo de la partícula. Toda modificación de la energía de una partícula requiere una interacción externa.

2-ARGUMENTO

En el ensayo que envié a la Revista Ciencia Abierta Vol 26 (Viaje hasta los límites de la física clásica), en una caso general una interacción verifica la desigualdad

$$dE \neq \bar{F} * d\bar{r}$$

Esto plantea el problema del papel de la energía potencial en la dinámica de un sistema central de tipo hidrogenoide: formado por un núcleo y un electrón de masa m_0 . Aunque la experiencia dice que el sistema puede llegar a un equilibrio sin emitir radiación, la dinámica dista mucho de ser de tipo clásico, y probablemente la masa del electrón no es constante en la interacción. En el citado ensayo también se razonaba la similitud entre el concepto clásico de energía potencial y el relativista de masa en reposo.

También se planteó que toda interacción de la partícula supone un cambio impredecible de la onda cuántica. En el caso del electrón hidrogenoide, suponemos que la interacción con el núcleo existe, sin embargo parece existir una situación de equilibrio en que la onda cuántica está perfectamente

determinada y “colapsa y se regenera sobre si misma”. Esto es lo que describe la ecuación de Schrödinger.

Propongo para este sistema hidrogenoide esta ecuación

$$E^2 = p^2 c^2 + (m_0 c^2 + eV)^2 \quad (1)$$

en la que se expresa que la energía potencial afecta a la masa del electrón. Esto supone elegir la función potencial de forma que, en ausencia de campo, en el infinito, sea $V=0$ y se recupere la masa en reposo del electrón. Esto se reduce a la expresión clásica de la energía como suma de energía cinética y potencial para el caso en que el módulo de la energía potencial sea mucho menor que la energía en reposo del electrón.

Con las sustituciones habituales

$$E \rightarrow -i\hbar \frac{\partial}{\partial t} ; \bar{P} \rightarrow -i\hbar \bar{\nabla}$$

y para un potencial de Coulomb se llega a esta ecuación

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \bar{\nabla}^2 \phi + (m_0 c^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon r})^2 \phi$$

cuyos autovalores de energía he calculado que dependen de este operador

$$\frac{1}{\rho^2} \left(\frac{d}{d\rho} \left(\rho^2 \frac{d}{d\rho} \right) \right) - \frac{\beta(\beta+1)}{\rho^2} + \frac{\mu}{\rho} - \frac{1}{4} = 0$$

$$\beta(l, Z) = \sqrt{(l+1/2)^2 + Z^2 \alpha^2} - 1/2; \mu = \frac{m_0 c^2 Z \alpha}{\sqrt{m_0^2 c^4 - E^2}}$$

$$N + \beta(l, Z) + 1 = \mu; \quad (N=0,1,2,3,\dots)$$

α es la c.t.e de estructura fina

l es el número cuántico de momento angular

De la definición de N, las auto-energías son, en módulo (hay 2 soluciones de signos contrarios)

$$E = m_0 c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{Z \alpha}{N + \beta(l, Z) + 1} \right)^2}$$

Esta energía está definida para cualquier valor de Z. Note el lector que esta forma matemática para la energía es la misma que se obtiene para la *dinámica clásica* de un movimiento circular uniforme central con potencial de Coulomb y con las correcciones de la relatividad especial. Una consecuencia interesante es que, para el estado fundamental de energía potencial mas baja, resulta para el promedio de la función potencial lo siguiente:

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon r} < m_0 c^2$$

lo que está de acuerdo con la idea intuitiva de que la masa de la partícula no resulta totalmente anulada en la interacción; de forma que es posible un equilibrio del sistema. La relación anterior se puede ver como una “explicación” de por qué el electrón del átomo de hidrógeno no cae al núcleo; y de que, si cae, supone la ruptura del equilibrio y la desaparición del electrón. En resumen aparece un efecto de oposición a la modificación de la masa del electrón. Esto también esta relacionado con la cuestión de por qué el radio clásico del electrón resulta ser del orden de las dimensiones del protón ($Z=1$).

Si definimos el número cuántico principal $n=N+l+1$; $n>l$ llegamos a la siguiente aproximación de 2º orden

$$E \approx m_0 c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{Z\alpha}{n + Z^2 \alpha^2 / (2l+1) + \dots} \right)^2}$$

con lo cual, como efecto relativista y sin tener en cuenta el *spín*, la energía de un electrón hidrogenoide depende de dos números cuánticos y es menor cuanto mayor sea l . Sin tomar en cuenta el término asociado al número cuántico angular, una primera aproximación genera el resultado conocido de la mecánica cuántica no relativista.

3-CONCLUSION

El movimiento de una partícula entorno a un centro de fuerzas supone, en física clásica, un equilibrio entre la inercia de la partícula y la fuerza central. La inercia tiende a oponerse a la modificación del movimiento de la partícula y la fuerza central tiende a favorecerla. La 2ª ley de Newton muestra como estas dos tendencias se combinan en el movimiento final de la partícula.

De forma similar, el presente apunte representa una ecuación de equilibrio entre inercia y fuerza externa. En las conclusiones del ensayo mencionado aparece la idea de que la inercia presenta dos formas :

- 1-Oposición a la modificación del movimiento.
- 2-Oposición a la radiación o modificación de la masa en reposo.

Estas dos condiciones se resumen en una:

La inercia de una partícula es la oposición a la modificación de su energía.

La posibilidad de un estado de equilibrio asociado a la ecuación (1), que expresa una modificación de la masa de la partícula, indica que las dos formas de inercia se ponen de manifiesto en el planteamiento de este apunte.

