LA FÍSICA Y LOS FÍSICOS

TEMARIO:

INTRODUCCIÓN

La historia de la ciencia en general y de la física en particular está llena de ejemplos de pasos gigantescos a partir de pequeños chispazos de comprensión y buen sentido. Por supuesto que los chispazos encienden el fuego cuando la leña está seca y la pira está preparada con esmero.

El objeto de estas líneas es despertar la inquietud científica de mis queridos alumnos, en particular en mi materia: la física. Estoy convencido que para aprender física se debe adoptar básicamente la actitud mental de un físico. Para ello nada mejor que estudiar la génesis de las ideas de los grandes investigadores de todos los tiempos: tratar de imaginar el proceso mental de esos hombres, muchos de ellos no mucho más inteligentes que nosotros, aunque si más entusiastas y trabajadores.

Todos estamos en condiciones de poner nuestros cerebros alerta para aprender y descubrir cosas si pensamos eficientemente.

Son aliados en este cometido la observación, la experimentación y la meditación de los resultados. El peor enemigo es creer que las ideas son exclusivamente fruto de una casualidad o inspiración divina. Según la actitud del observador la caída de una manzana puede producir la ley de gravitación en el papel, una compota en la olla o una fruta podrida al pie del árbol.

Américo Luis Dini - 1996

Creencia y Ciencia:

Cuando leemos que los antiguos ***creían*** que la tierra estaba soportada por tortugas y elefantes y otras cosas por el estilo, tenemos derecho a pensar que los científicos de esos tiempos no tenían interés alguno en cotejar sus teorías con la realidad.

Es que no se había puesto de moda el método riguroso, por lo menos en las ciencias físicas. ***Se creían*** alegremente muchas cosas porque estaban de acuerdo con conceptos e ideas de moda, o porque las decían o les gustaban a algunos personajes importantes. No debemos asombrarnos porque todavía hoy, después de siglos de ejercicio del pensamiento científico, hay muchos hombres de ciencia encumbrados que toman partido a favor o en contra de ideas según les “parece”, con poco o ningún fundamento experimental.

Encuentro relación entre lo dicho y mi experiencia personal relatada en el siguiente párrafo.

El proceso del “Yo creía”, o el “Me parece” están arraigados al ser humano. Quizás sean el fruto de pereza mental o de una idealización de lo real, o ambas cosas a la vez. Posiblemente los psicólogos encuentren su raíz en algún trauma de la infancia (un Edipo es muy conveniente).

Me acuerdo que mi padre, muy severo él, me hacía notar las veces que yo empleaba estas formas erróneas de razonamiento con tal sorna, que hube de desterrarlas aunque más no fuera por evitar la posición de tonto en que quedaba después de emplearlas. Por ejemplo, adelgazaba la pintura con querosén en vez de aguarrás, porque encontraba la botella de aquél más a mano. El resultado era una pintura que tardaba un siglo en secar.

-¿Con qué mezclaste la pintura de la reposera de tu mamá, que no seca nunca? -me preguntaba papá.

- Con querosén, padre- respondía yo, presintiendo ya el final poco feliz del asunto.

- ¿Por qué el cambio, si siempre lo hacés con aguarrás? ¿No ves que la silla se ha llenado de tierra al estar dos días afuera pegajosa?

- Es que encontré primero el querosén y creí que serviría lo mismo.

- Ah!.., claro, vos creíste....(sensación de tener puesto un bonete de burro). Bueno! ¡ Ahora le sacás todita la pintura, la limpiás con un trapo con aguarrás y la pintás de nuevo como Dios manda! ¡Y por favor, hijo, someté tus creencias al razonamiento o preguntá antes! El aguarrás es más volátil que el querosén. Si todos usan aguarrás por algo será. Hacé innovaciones en pequeña escala antes de arruinar una tarde de trabajo. Y sobre todo no te engañes, porque tu actitud en este caso fue de pereza por no estirar la mano al estante de arriba. No fue por experimentar con nuevos solventes.... - Y así yo soportaba el chubasco hasta que se calmaba el temporal.

Fastidiado tantas veces por asuntos parecidos, aprendí por fin que las creencias y los pareceres deben tamizarse aunque sea un poco por el cedazo de la reflexión. A ello contribuyó mi inflexible padre, que no me perdonaba una. ¡Y qué bien hacía!

Me parece (¿Cómo dices, hijo?) que en ciencia debe pasar lo mismo: pereza y falta de reflexión. Que alguno reflexione sobre ello.

TARTAGLIA

Allá por el 1500 *se creía* que la trayectoria que seguía un proyectil de fusil era una recta. En el caso del tiro de morteros *se creía* que la trayectoria estaba formada por dos rectas unidas por un arco de curva...

¡Como si el proyectil fuera instruido por algún mandato misterioso! :

Mira tú bala, ve derechito puesto que provienes de un arcabuz del escuadrón del rey. En cambio tu, bola de plomo, sube hasta que más o menos tengas ganas, luego haz una gentil vuelta circular y cae rectamente: ¡no olvides que te ha lanzado un mortero del gloriosos ejército imperial!

¿A qué se debían esas alegres afirmaciones si con un poco de observación podían fácilmente refutarse?. Mirando el chorro de agua ascendente de un pico de una fuente pública, cualquiera ve que la trayectoria es una curva en todos sus tramos. Si el pico apunta horizontalmente el chorro es también curvo. En esa época había fuentes en abundancia en las ciudades y seguramente muchos de sus habitantes miraron y hasta pintaron chorros curvos, pero no era usual que se confrontaran las ideas con la experiencia. No era para todos la universidad, no había revistas y recién comenzaban las sociedades científicas, frecuentadas por algunos miembros muy buenos y otros no tanto.

Entre los buenos estaba Nicolás Tartaglia (1500?-57), un matemático de nota que también se tomaba la física en serio. Seguramente las opiniones sobre el “vuelo” de proyectiles de sus contemporáneos no le gustaron a Tartaglia, quién hizo observaciones más minuciosas. Fruto de ellas, alrededor de 1530 escribía en un tratado sobre armas de fuego que “ninguna parte de la trayectoria de un proyectil podía ser una recta” y que “cuanto mayor era la velocidad del proyectil, menos curva era su trayectoria”. Así está mejor.

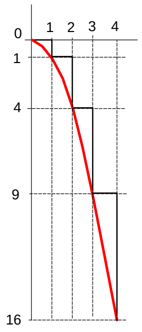
GALILEO

El método científico moderno fue aplicado por primera vez a la Física por Galileo Galilei (1564-1642), en el estudio de la caída de los cuerpos. Sus leyes son tan buenas que se aplican hoy como él las dedujera entonces.

Como todos los físicos que alguna vez descubrieron algo, Galileo *creía* poco y en cambio observaba atentamente, experimentaba y pensaba. Tal vez luego cerraba los ojos y soñaba. Una vez mientras hacía de monaguillo en la Iglesia de su Pisa natal observó la oscilación de un candelabro colgante que él mismo acababa de empujar con el encendedor: el período se mantenía a pesar de que las amplitudes iban disminuyendo. Experimentando con péndulos en su casa descubrió que el período sólo dependía de la longitud de la cuerda que sostenía el cuerpo, y no del peso de éste. Después vino la etapa imaginativa, con los ojos cerrados: una oscilación es una caída controlada por el hilo, pensó. ¿No sería que la ley de caída de los cuerpos tampoco dependía del peso de los mismos?

Galileo experimentó entonces con la caída libre de cuerpos de diversas formas y pesos. Largados desde lo alto de la famosa Torre de Pisa vio que todos llegaban al suelo más o menos al mismo tiempo. Observó que su velocidad crecía a medida que caían y postuló que la misma era proporcional al tiempo transcurrido (**v=a.t** donde la constante de proporcionalidad es la aceleración a). De ello dedujo que la distancia recorrida **e** debía ser proporcional al cuadrado del tiempo: en efecto si la velocidad al cabo de un tiempo **t** es **v=a.t** la velocidad promedio arrancando de cero será $v_{media}=a.t/2$. El espacio recorrido al cabo de **t** resulta $e=v_{media}.t$ de donde también $e=1/2\ a.t^2$

Comprobó esta fórmula usando la cámara lenta de la época: el plano inclinado, donde la caída libre se morigera usando la proyección de la aceleración sobre un plano con pendiente.



TIRO HORIZONTAL

A Galileo se debe también el “Principio de superposición”: Se puede estudiar un fenómeno compuesto por dos o más fenómenos simples que actúan simultáneamente como si actuaran uno después del otro separadamente: Por ejemplo el tiro horizontal (y también el oblicuo) de un proyectil puede descomponerse en un movimiento de caída libre vertical y un movimiento uniforme horizontal. El movimiento vertical es acelerado, como ya vimos, o sea de velocidad variable. En cambio el horizontal es de velocidad constante. Al cabo de cuatro períodos de tiempo el móvil avanza cuatro y cae dieciséis. El resultado de una sucesión de avances iguales y caídas cada vez mayores es una poligonal en escalera. Si se la descompone en escalones cada vez menores resulta una parábola como la de la figura.

KEPLER

El astrónomo alemán Juan Kepler (1571-1630) fue otro que se tomó las cosas en serio. Kepler era ayudante del famoso astrónomo danés Tycho Brahe, el que vio y describió la nova (superestrella) que lleva su nombre. Estudiando cuidadosamente las anotaciones de su maestro, Juan pensaba intensamente: Seguramente fue un trabajo arduo resumir innumerables páginas de números en sus célebres tres leyes, que describen el movimiento planetario heliocéntrico supuesto ya por Copérnico años antes. La primera dice que las trayectorias de los planetas son elipses en uno de cuyos focos está el sol. La segunda, llamada también ley de las áreas, establece que la recta que une el centro del planeta con el sol barre áreas iguales en tiempos iguales, es decir que cuando más próximo al sol está, más rápido va. La tercera dice que si R es el diámetro medio y T el período de la órbita, es constante la razón R^3/T^2 para cualquier planeta. Kepler era astrónomo y sabía mucha matemática. Estas leyes lo prueban.

NEWTON

Los descubrimientos de Galileo y Kepler abrieron rumbo para que Sir Isaac Newton publicara en 1687 su famosa ley de gravitación universal en sus "Principios matemáticos de filosofía natural". La obra de Newton es sencillamente lo máximo en física. Lo sitúa como el físico más grande de todos lo tiempos, no superado hasta ahora por ningún otro. De paso, para poder desarrollar sus ideas, inventó un método de cálculo matemático que le dio no sólo a la mecánica sino a la todas las ciencias cuantitativas una herramienta de potencia desconocida hasta entonces: el "cálculus" o cálculo infinitesimal.

¿Qué pasaba con Newton? ¿Era un superhombre?. Hoy, después de trescientos años, seguimos viendo su obra como la de un gigante.

Vamos a tratar de escudriñar cuál fue el proceso mental que tuvo este genio extraordinario para llegar a tan refinados descubrimientos:

Para Newton explicar un fenómeno pasaba por poder expresar "todo pasa como si....". Así postuló su principio de inercia: Todo pasa como si los cuerpos se resistieran a cambiar su estado de movimiento uniforme (recto sin cambio de velocidad) o de reposo, que era un caso particular del anterior con velocidad nula: Los cuerpos permanecen en su estado de movimiento uniforme o reposo a menos que sean perturbados por una fuerza.

La fuerza pasó a ser entonces lo que hacía variar la velocidad de los cuerpos. La variación de la velocidad, o sea la aceleración, era proporcional a la fuerza aplicada e inversamente proporcional a una constante que dependía del tamaño y pesadez del cuerpo: la masa. Así llegó a la famosa fórmula F=m.a (fuerza igual a masa por aceleración)

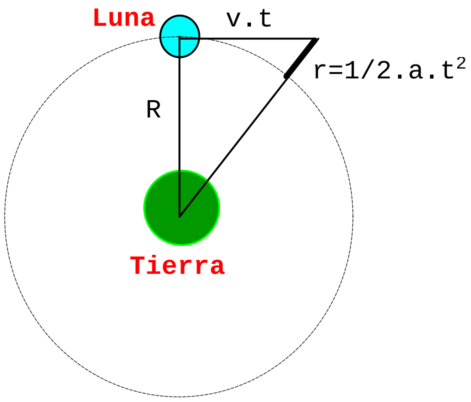
Sir Isaac Newton en la Granja de Lincolnshire

En sus escritos Newton nos cuenta que por el año 1665 venía reflexionando sobre la fuerza de atracción ejercida por la tierra sobre los objetos, y se preguntaba qué fuerza era la que mantenía los planetas en órbita. Sin duda que la preocupación en esos temas había puesto su mente privilegiada en estado de alerta, extraordinariamente receptiva para captar y elaborar cualquier signo de la Naturaleza.

Y el signo vino. Por entonces se desató una terrible peste en Londres, así que cerraron la universidad de Cambridge donde Newton enseñaba. No hay mal que por bien no venga, y Newton se tomó unos días de descanso y aislamiento en una granja de Lincolnshire, suburbio de Londres.

Mientras muchos desdichados morían de peste en la ciudad, Isaac, más afortunado paseaba temprano por el huerto. Allí vio ponerse la luna llena, a tiempo que caía una manzana madura de un árbol. La caída de la manzana con el fondo de la luna que avanzaba lentamente hacia el horizonte le sugirió a Newton una misma causa para ambos fenómenos: la manzana y la luna caían ambas atraídas por la tierra: la manzana chocaba contra la tierra, pero la luna estaba mucho más lejos: no había tierra debajo (estaba en órbita).

Aplicando el principio de superposición supuso que la luna L (ver dibujo) en su órbita casi circular alrededor de la tierra avanzaba durante un instante **t** un trecho corto **v.t** (principio de inercia) y luego caía libremente hacia la tierra **T** con aceleración **a** un trecho **$r=1/2\ a\ t^2$** (como lo había enseñado Galileo). Aplicando el teorema de Pitágoras al triángulo rectángulo resulta: **$R^2+(vt)^2=(R+r)^2=R^2+2Rr+r^2$**



Pero ahora viene un novedoso razonamiento de Sir Isaac: Cuanto más corto considere el instante **t** tanto más real será la superposición de efectos comparada con la realidad del movimiento de la luna, sobre la que operan simultáneamente la caída hacia la tierra y la tendencia a escapar por la tangente. Así que Newton optó por razonar con intervalos de tiempo **t** pequeños. Si **t** se toma arbitrariamente pequeño representado por una serie de valores cada vez menores (1/10 , 1/100 , 1/1000) le corresponderá otra serie de valores de **t^2** mucho menores aún (1/100, 1/10000 , 1/1000000) , y otra serie de valores todavía muchísimo más pequeños de t^4 así que en la igualdad **$(vt)^2=2Rr+r^2$** es lógico que cuando **t** tienda a ser pequeño, podamos despreciar los términos que contienen t^4 , o sea los que llevan **$r^2=1/4\ a^2.t^4$** , resultando entonces que **$(vt)^2 \approx 2Rr = 2.R.1/2.a.t^2 = R.a.t^2$** , con lo cual podemos poner **$v^2=R.a$** y entonces la aceleración de caída de la luna hacia la tierra será **$a=v^2/R$**

Si despreciamos la pequeña excentricidad de la órbita la velocidad v de la luna será constante y valdrá la longitud de la órbita dividida por el tiempo que tarda en dar una revolución. Se sabía en época de Newton que el radio promedio R era de 384400 Km, por lo tanto la longitud de la órbita de la luna valía $2.\pi.R$=2415262 Km

El tiempo que tarda la luna en dar una vuelta a nuestro planeta es, como bien sabemos, 28 días o cuatro semanas. Así que v=86259 Km/día=998 m/s con lo cual a=0,0026 m/s^2

Ahora bien, en la superficie de la tierra , a ρ=6371 Km del centro de la tierra sabemos que una manzana cae con una aceleración de g=9,8 m/s^2

¿Qué relación hay entre los dos valores? ¿Tendrá que ver con la distancia?

Veamos...

- Relación de aceleraciones entre manzana y luna: g/a = 9,8/0,0026 =3769
- Relación de distancia entre luna y manzana : R/ρ = 384400/6371 =60,33

Dividiendo la primera por la segunda da aproximadamente 60, o sea que la primera es el cuadrado de la segunda. Newton sabía que la Naturaleza no pone relaciones de cuadrados por casualidad, así que aventuró que la ley buscada es precisamente esa: $g/a = R^2/\rho^2$ o bien **$a=g.r^2/R^2$** , lo que traducido al castellano afirma que la aceleración gravitatoria es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

El famoso principio de acción y reacción dice que las fuerzas existen de a pares. Una fuerza nunca está sola: siempre hay otra igual y contraria que la equilibra. Si la tierra “tira de la luna”, es seguro que la luna “tira de la tierra” con la misma intensidad, sino fuera así sobre el sistema tierra/luna actuaría una fuerza neta que lo aceleraría hacia algún lado, cosa que los astrónomos nunca observaron.

Volvamos a la fuerza de atracción tierra/luna, que vale:

$F = M_l.a = M_l.g.r^2/R^2$ (1)

Ahora consideremos con Sir Isaac a la fuerza luna/tierra, que debe valer lo mismo, como quedó bien claro. Con idéntico razonamiento al de Newton en la tierra, un físico de la luna debería poder expresar en base a la masa de la tierra M_t y a la aceleración de la gravedad de la luna g_l lo siguiente:

$F=M_t.g_l.r_l^2/R^2$ (2), de donde surge evidentemente que $M_l.g.r^2=M_t.g_l.r_l^2$ y $g.r^2=M_t(g_l.r_l^2/M_l)$ (3), con lo que la fuerza de atracción entre tierra y luna resulta finalmente:

$F = (g_l.r_l^2/M_l)\ M_l.M_t/R^2 = (g.r^2/M_t).M_l.M_t/R^2$

Los términos entre paréntesis son matemáticamente iguales: Para un físico esa igualdad matemática indica que la cantidad entre paréntesis es una constante universal, o sea que siempre vale lo mismo la relación entre la aceleración de la gravedad en la superficie de un cuerpo esférico cualquiera (tierra o luna, u otro) de radio ρ multiplicado por su radio al cuadrado y dividido por su masa. No interesa de qué cuerpo se trate: podríamos haber razonado modernamente con un satélite artificial de masa M_s y radio ρ_s, obteniendo igualmente:

$(g_s.r_s^2/M_s)\ M_l.M_t/R^2 = (g.r^2/M_t).M_l.M_t/R^2$

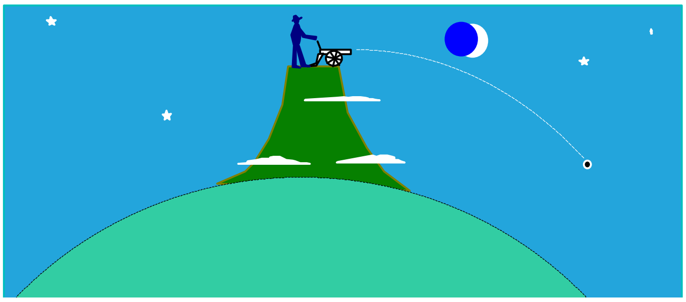
Reemplazando valores ($g=9{,}81\ m/s^2$; $\rho^2=4{,}06.10^{13}\ m^2$; $M_t=5{,}18x10^{24}Kg$) la constante gravitatoria universal vale:

$G =(g.r^2/M_t)=7{,}69x10^{-11}$ en unidades MKS

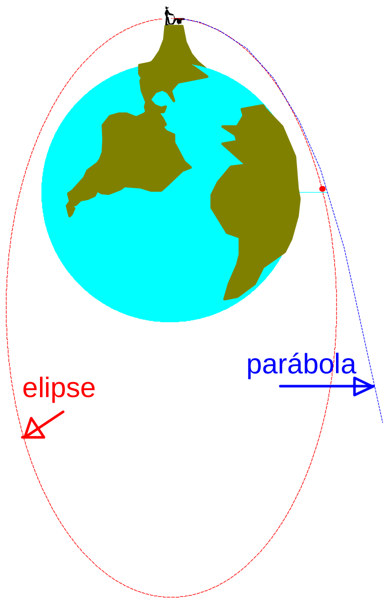
Si los cuerpos (supuestos esféricos) tuvieran densidad constante δ su masa valdría el producto de su volumen y la densidad, así que para cuerpos esféricos de densidad constante vale $M=4/3.\pi.\rho^3.\delta$ con lo cual las cantidades entre paréntesis valen genéricamente **$(3/4.a/d/r/p)=7{,}69x10^{-11}$** , o sea **$a=3{,}2x10^{-10}.r.d$**

De acuerdo con lo anterior la densidad media de la tierra resulta:

$d=g/3{,}2x10^{-9}.r = 9{,}81/3{,}2.10^{-10}/6371000 = 4800\ Kg/m^3$



Se encontraron dibujos de Newton en los que se representaba la puesta en órbita de un objeto lanzado horizontalmente desde un sitio muy alto, un promontorio gigante imaginario. Para que la bala de cañón no caiga sobre la tierra debe salir con una velocidad horizontal tanto mayor cuanto menor sea la altura del promontorio. Esto constituye una inteligente visión anticipadora del modo en que hoy se ponen en órbita nuestros ingenios satelitales, impulsándolos horizontalmente una vez que se han elevado lo suficiente.



Pero ¿cómo? ¿No es que la trayectoria de un tiro horizontal es una parábola? : Lo sería si la tierra fuera plana y la fuerza de gravedad perpendicular a ella. Si el tiro es de larga distancia (por ejemplo el de un proyectil balístico intercontinental) importa la curvatura de la tierra y la gravedad cambia de dirección ya que apunta siempre hacia el centro de la tierra. En rigor la trayectoria es siempre una elipse, como lo observó Kepler. Entre un arco de elipse y una parábola hay poca diferencia, tanto menor cuánto mas corto sea el tramo.

Otra manera de ver las cosas en lo que toca a objetos en órbita es considerar que la fuerza de gravedad actúa como el hilo de largo R que mantiene una piedra revoleada con la mano. La piedra tira del hilo con la fuerza de inercia, que la obliga a mantenerse en trayectoria circular. La aceleración que sufre (aceleración centrípeta) es la de un movimiento de la piedra hacia el centro que compensa la tendencia al escape por la tangente con velocidad v. Vimos que dicha aceleración vale v^2/R

Las leyes de Kepler y en general todos los fenómenos celestes se deducen como consecuencia de la ley de gravitación, aplicando un concepto de cálculo nuevo que Newton descubrió simultánea e independientemente del filósofo alemán Leibnitz: el cálculo infinitesimal o simplemente “cálculus”.

CÁLCULUS

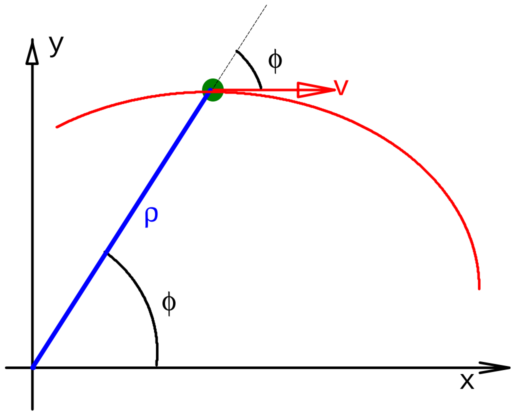
El cálculus emplea el concepto de estudiar funciones matemáticas en el entorno de un punto. Las propiedades puntuales de las funciones incluyen además de su valor, la tendencia de cambio: aplicamos cálculo infinitesimal cuando decimos que las acciones de la Compañía de Alimentos valen $45 y están en alza. Si queremos ser más precisos respecto a su tendencia decimos que subieron 12 puntos en una semana. La acción se caracteriza por su valor actual 45 y la tendencia a subir 12 a la semana. La decisión de compra o venta de acciones basada en esta combinación de valores es mucho mejor que la que surge de considerar solamente si está barata o cara. ¿Por qué? Porque la tendencia nos da una idea de lo que puede pasar a cierto plazo (más o menos largo).

Pasando a mecánica, para caracterizar el movimiento de un cuerpo es necesario contar en todo momento con su posición y su velocidad. Los físicos llaman a estas variables “coordenadas” del móvil. La trayectoria es una curva en el espacio caracterizada por una ecuación matemática: por ejemplo una parábola (función cuadrática) para un proyectil lanzado a corta distancia en el vacío. Con la trayectoria no definimos completamente el movimiento: sabemos que por las vías de Temperley pasará el tren pero para tomarlo necesitamos el horario de pasada. Si un Jefe de Estación ideal nos diera la pauta (ley) de variación de la velocidad con el tiempo y el momento en que sale de Constitución, podríamos interceptarlo en cualquier punto del recorrido.

¿Qué es en definitiva la velocidad? : es la tendencia que presenta un móvil a variar su posición. Es una magnitud instantánea que informa sobre la posición futura inmediata. Al pasar por la estación el convoy tiene una velocidad de 50 Km/h (cincuenta kilómetros por hora). ¿Quiere decir que dentro de una hora estará a cincuenta kilómetro de aquí?. Sabemos que no necesariamente. Sin contar con accidentes y paradas imprevistas una ligera pendiente sería suficiente para alterar nuestro pronóstico. En cambio es muy razonable pensar que dentro de un minuto estará a :50x1/60=833 metros y casi seguro que en dos segundos avanzará 50x2/3600=27,7 metros. Podemos pues definir a la velocidad instantánea (la que marca el velocímetro de la locomotora) como el cociente entre espacio recorrido y tiempo empleado cuando el intervalo considerado es arbitrariamente pequeño. La operación de calcular algo con variables arbitrariamente pequeñas se llama “paso al límite” y “limite” al resultado de esa operación. La velocidad es el límite del cociente ente espacio y tiempo cuando el segundo toma valores infinitesimales. Newton llamó fluxión a este límite. Leibnitz la denominó como la llamamos ahora: función derivada.

A pesar de que Newton haya sido el impulsor de la idea del cálculo, el concepto primitivo de velocidad instantánea que usó era igualmente preciso, aunque muy otro. La velocidad instantánea hasta la llegada del cálculus era un concepto más físico que matemático: según este concepto un móvil tiene una velocidad instantánea v cuando abandonado a toda acción exterior y por lo tanto dotado de movimiento uniforme, recorriera v metros en 1 segundo.

El concepto de fluxión o derivada es mucho más potente que el anterior: es el cociente del incremento de la variable dependiente (la posición) frente al incremento de la variable independiente (el tiempo).



La posición de un cuerpo en el espacio está dada por sus coordenadas espaciales, vale decir los números que permiten ubicarlo en el sitio preciso a partir de un origen de referencia. Por ejemplo un punto de un plano está determinado por sus coordenadas x e y . Uniendo este punto con el origen queda determinado el vector posición $\mathbf{r}$. Podemos definir la velocidad del móvil por el fluxión de su vector de posición, que en la notación de Newton se pone con un punto sobre la variable , así : $\dot{\rho}$ En la de Leibnitz (más cómoda tipográficamente) es $d\rho/dt$. El fluxión de la velocidad es a su vez otro vector que representa la aceleración del movimiento. La aceleración es entonces el fluxión del fluxión de la posición ρ. Según la notación de Newton el doble fluxión se pone como dos puntitos sobre la variable respectiva, $\ddot{\rho}$, pero también con la notación de Leibnitz indicando un doble cociente incremental $d^2\rho/dt^2$

El movimiento planetario estudiado con el método de Newton produce las leyes de Kepler como una consecuencia natural:

Llamando $\mathbf{r}$ al vector posición de un planeta de masa m con origen en el sol de masa M, resulta:

la fuerza gravitatoria $F=G.M.m/\ \mathbf{r}^2$, como dice la ley de Newton.

la fuerza de inercia vale = $m.\ddot{\mathbf{r}}$

La igualación de ambas es condición para que el planeta esté en equilibrio (en órbita). De ella surge que:

$\ddot{\mathbf{r}}\mathbf{=GM/r^2}$, que es la ecuación “fluxional” de la órbita.

Una conclusión inmediata de la simplificación matemática de la masa del planeta m en ambos miembros de la igualdad anterior es que el movimiento planetario no depende de la masa del planeta en cuestión y si en cambio de la del cuerpo central. Volviendo a la experiencia cotidiana, la misma razón por la que todas los cuerpos caen a la misma velocidad en al vacío.

Para resolver completamente dicha ecuación hace falta saber toda la técnica del cálculo infinitesimal, que Newton desarrolló durante varios años siguientes al descubrimiento de su ley. Recién cuando lo tuvo listo publicó sus resultados en los “Principia”. Allí aparecen como soluciones a la ecuación anterior las órbitas elípticas, la velocidad areolar constante y la tercera ley de Kepler, además de una coincidencia numérica asombrosa con de los cálculos con los períodos y trayectorias reales de los cuerpos celestes.

Newton abordó con incuestionable solvencia muchos otros temas de física: mecánica de fluidos y óptica, por ejemplo. En óptica sentó las bases de la teoría corpuscular de la luz, que se contrapuso en su época a la teoría ondulatoria de Huygens. Ésta última sin embargo ganó momentáneamente en popularidad hasta que ambas resultaron complementarias cuando se descubrió, en este siglo, que corpúsculos y ondas eran inseparables manifestaciones de la materia en movimiento. Volveremos a este tema más adelante.

MACH

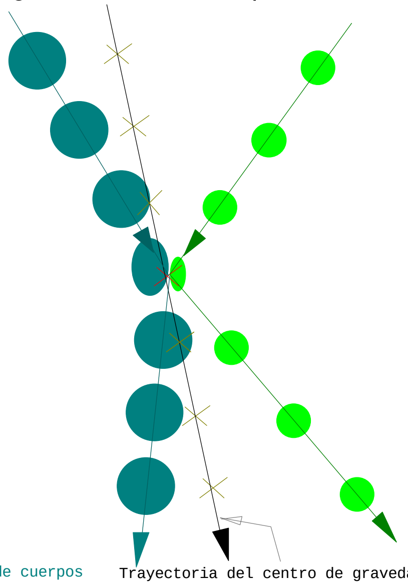
Newton aparentemente no se ocupó de buscar la relación entre la fuerza de gravedad y la fuerza de inercia, es decir la relación entre la atracción universal, esa fuerza a distancia que brota de las masas y alcanza a otros cuerpos, y la fuerza necesaria para cambiar la velocidad de un móvil, la fuerza de contacto del palo de golf contra la pelotita. En ambos casos figura la masa del cuerpo y lo que cambia es la aceleración, en un caso gravitatoria y en otro de inercia. ¿Qué relación habrá entre ambas?

Recién Ernst Mach (1838-1916), filósofo y físico austríaco, arrojó luz sobre la cuestión allá por el 1860. Mach es popular en nuestros días por sus descubrimientos en aerodinámica, una de las tantas disciplinas que abordó como físico. La relación entre la velocidad de un móvil y la del sonido es el “número de Mach” y así hoy leemos que el avión Concorde vuela a Mach 2 (el doble de la velocidad del sonido). Algunas marcas de motos y autos deportivos llaman a sus modelos Mach I o Mach II, tentando a pisar a fondo el acelerador para llegar volando al otro mundo.

Pero el fuerte de Mach fue la filosofía de la ciencia física. Preocupado sobre el tema de las fuerzas de inercia y las gravitatorias, propuso que la primera fuera también un efecto entre masas, una relación entre la masa que sufría la aceleración y todo el resto de la masa del universo: Según Mach el universo entero tiraba de algo que trataba de acelerar su marcha, oponiéndose al cambio. No habría inercia si no hubiera otros cuerpos: nada aceleraría si fuese el único objeto empujado.

El asunto está ligado a otra forma de enunciar la ley de la conservación de la cantidad de movimiento: el principio de permanencia del centro de gravedad de un sistema con su velocidad inicial.La cantidad de movimiento de un cuerpo de masa m que se mueve a velocidad v es el producto m.v   Newton lo usó para evaluar la fuerza, como variación de la cantidad de movimiento.

El centro de gravedad de un sistema de cuerpos es algo bastante bien conocido para cualquier estudiante de física; por lo menos intuitivamente sabemos dónde habría que poner una pesa de dos kilos para reemplazar a dos de 1500 y 500 gramos. Con algo más de esfuerzo podremos determinar dónde colocar el gancho de izaje a una plataforma triangular con tres personas de distinto peso paradas en sus vértices.



Choque de cuerpos   Trayectoria del centro de gravedad

Si varios cuerpos reaccionan entre sí se mantiene su centro de gravedad quieto o en movimiento uniforme; este principio es equivalente al de conservación de la cantidad de movimiento.

Antes y después de un choque de cuerpos se conserva la cantidad de movimiento total del sistema, esto es la suma de las masas por sus velocidades respectivas de cada cuerpo. Esto permite averiguar el estado del sistema en cualquier momento antes y después del choque. Se demuestra que es equivalente plantear que en todo momento se mantiene el centro de gravedad del sistema en su movimiento rectilíneo y uniforme: Por ejemplo dos bolas de diferente masa una del doble de la otra, pero con velocidades iguales y direcciones encontradas, chocan entre sí. No importa si el choque es elástico o con pérdida de energía (inelástico), se mantiene siempre el centro de gravedad del sistema situado siempre a un tercio de la distancia que separa las bolas, hacia la de mayor masa.

¿Qué nos dice Mach al respecto? Que si no hubiera otras masas en el universo que estas dos bolas no tendría sentido hablar de movimiento del centro de gravedad. Tampoco habría posiblemente leyes de interacción entre ambas. Ni siquiera se puede afirmar que siguieran trayectorias rectas ni que chocarían entre sí.

Esta idea notable de Mach llevada a ultranza propone que las leyes físicas dependen del conjunto del universo, de su estado, densidad y configuración. Algún conocedor de la obra filosófica de Mach nos podrá decir si esta concepción surge de su filosofía o nace independientemente de una notable intuición física. Por lo que he leído, la filosofía de Mach se basa en que la experiencia perceptiva a través de los sentidos es la que debe determinar una teoría científica. No se ve que el principio de Mach tenga que ver con esto, así que además de filósofo y físico, Mach era alguien de extraordinaria imaginación que se adelantó con su hipótesis a las más modernas teorías actuales sobre los orígenes de las interacciones entre partículas elementales. Veremos luego que según estas teorías la constante gravitacional G depende de la edad del universo o más precisamente de su estado de dispersión.

Volveremos a Mach a propósito de otros temas, por ejemplo la relatividad de Einstein.

FÍSICA ELECTROMAGNÉTICA - MAXWELL

La electricidad es una rama de la física que tuvo un desarrollo muy rápido en la segunda mitad del siglo pasado, gracias a los trabajos de Faraday, Maxwell y Lorentz. James Clerk Maxwell(1831-1879), siguiendo a otro británico, Michael Faraday, sistematizó en cuatro ecuaciones diferenciales (fluxionales) toda la electricidad. Las ecuaciones de Maxwell tienen una importancia enorme en el desarrollo de la física: imprimieron a la misma de un sello especial: el sello electromagnético, que abrió el camino a descubrimientos como la relación entre masa y velocidad, o entre masa y energía entre otros.

En realidad las ecuaciones de Maxwell trabajan con conceptos de electricidad conocidos: carga, corriente, campo eléctrico y magnético, fuerzas de Biot-Savart, fuerza electromotriz inducida, etc. Si bien las relaciones matemáticas deducidas de leyes experimentales no agregan información verdadera, una presentación matemática adecuada o una relación conveniente revela casi siempre un significado oculto. Es lo que pasa con las ecuaciones de Maxwell, que producen una verdadera revelación cuando se las ve juntas, como las piezas de un rompecabezas a punto de terminarse.

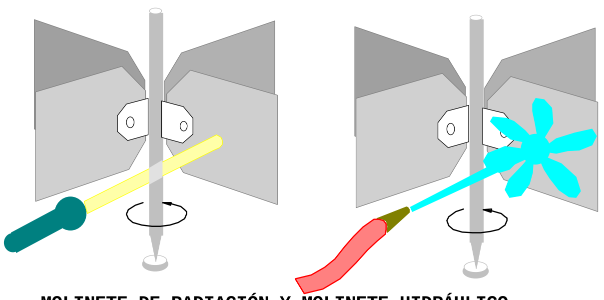
El físico-matemático se siente así invitado a armar una configuración fluxional de igual forma a las que describen las ondas en una cuerda tensa, pero en vez de variables mecánicas como la elongación de los puntos de la cuerda, aparecen intensidades de campos eléctricos y magnéticos.

El fenómeno de las ondas mecánicas en las cuerdas tensas era bien conocido desde el siglo XVIII , en que fueron estudiadas sus ecuaciones representativas por el físico francés D’Alembert. En las ecuaciones de las ondas mecánicas de una cuerda aparece un grupo de constantes que determinan la velocidad de translación de las ondas: en la fórmula dicha velocidad depende de la tensión T a la que está sometida la cuerda y su masa por unidad de longitud δ. A cuerda más tensa mayor velocidad. A cuerda más pesada menor velocidad. Resulta así que la velocidad de propagación está dada por: $v=(T[N]/\delta[Kg/m])^{1/2}$

El grupo equivalente a la velocidad en las ecuaciones de las ondas eléctricas está compuesto por dos constantes eléctricas que dependen del medio: la constante dieléctrica ε y la permeabilidad magnética μ. Haciendo la cuenta la velocidad que sale de la fórmula es de $c = 1/(\varepsilon.\mu)^{1/2} = 3x10^8$ m/s : el mismo valor de la velocidad de la luz en el vacío, bien conocida gracias a los trabajos de Römer en el siglo XV y los experimentos de Fizeau en el XIX. Esto llevó a pensar que la luz, conocida ya por sus características ondulatorias era seguramente una onda eléctrica o mejor dicho una onda electromagnética, ya que suponía la oscilación de campos eléctricos y magnéticos.

Poco después de este descubrimiento matemático, Hertz detectó en el espacio de su laboratorio que efectivamente se producían ondas electromagnéticas a partir de descargas eléctricas emitidas por un aparato precursor de nuestros transmisores de radio actuales. Produjo ondas estacionarias reflejándolas en una pared metálica y midió la distancia entre nodos y máximos con un sencillo anillo cortado. Comprobó que su velocidad era igual a la de la luz.

La radiación electromagnética, de la que la luz es un caso especial, ejerce presión sobre las superficies que la absorben o que la reflejan. La presión de radiación es una fuerza por unidad de superficie que se puede transformar en la rotación de un molinete, en forma parecida a la presión de un chorro de agua que acciona un molinete hidráulico. Maxwell determinó que su valor coincidía con la energía del campo electromagnético por unidad de volumen, que vale el producto del campo eléctrico E por el desplazamiento eléctrico D. Así $P=E.D=\varepsilon.E^2$



MOLINETE DE RADIACIÓN Y MOLINETE HIDRÁULICO

No hay indicios de que los físicos de la época de Maxwell se hayan planteado que la presión de radiación pudiera provenir formalmente de una variación de cantidad de movimiento, como la fuerza mecánica. En tal caso podrían haber razonado que la luz tendría algo equivalente a la masa mecánica m o a la cantidad de movimiento m.c y hubieran llegado antes que Einstein a la famosa relación entre energía, masa y velocidad de la luz mediante un razonamiento sencillo, como el siguiente:

En efecto si la variación de la cantidad de movimiento de una onda electromagnética que produce una presión de radiación P ejerciendo una fuerza F sobre una superficie absorbente S (una antena o la paleta del molinete) será P=F/S = E.D y además si la luz tiene velocidad $c=\Delta x/\Delta t$ resulta en un intervalo $\Delta t=\Delta x/c$ que $F.\Delta t=F.\Delta x/c=m.c$ o bien $F.\Delta x=m.c^2$. Pero el trabajo de la fuerza $F.\Delta x$ es igual a $P.S.\Delta x=P.\Delta v$ o sea la energía electromagnética contenida en el volumen ΔV de radiación, es decir que el equivalente de la energía electromagnética transformada en trabajo mecánico es $m.c^2$. ¡Llegamos así que la famosa fórmula de Einstein está contenida en el electromagnetismo de Maxwell!...

EL EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY:

A fines del siglo pasado se respiraba un aire puro en el ambiente de los físicos de todo el mundo científico: la Naturaleza parecía dar la razón a las leyes de Newton hasta en sus últimas consecuencias; las cuentas se ajustaban hasta el quinto decimal. Todo era claro y predecible hasta que....

Hasta que en 1887 se le ocurrió a un óptico experimental de primera línea, el norteamericano Albert Abraham Michelson, realizar un experimento con un delicado aparato de su invención: un interferómetro. Michelson no se dio cuenta que estaba mezclando óptica (electromagnetismo) con mecánica, o si se dio cuenta no reparó que los resultados podrían no ser los convencionales.

Un interferómetro es un ingenio que permite determinar diferencias de caminos extremadamente pequeñas, aprovechando que la luz de una misma fuente que se separa en dos caminos presenta una diferencia de fase cuando se vuelve a juntar si los trayectos no son iguales. Como la longitud de onda de un rayo luminoso es de medio micrón, una diferencia de camino de un cuarto de micrón (0,00025 mm) produce oscuridad en el punto de superposición de los dos rayos donde antes había luz y viceversa.

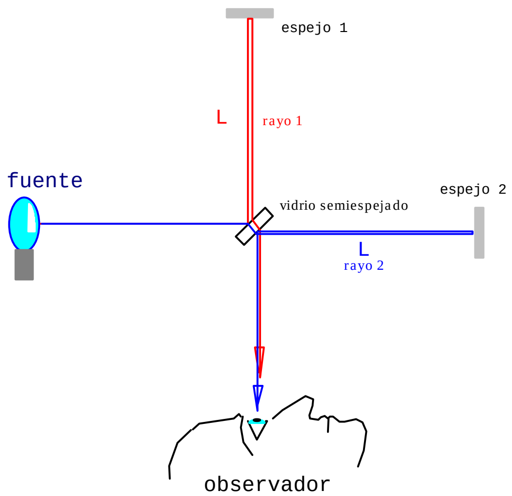
Aprovechando este medidor de longitudes extraordinariamente preciso Michelson quiso probar si el medio en que se propagaba la luz era como el aire frente al sonido: La velocidad del sonido es de 340 m/s en el aire quieto. Si hay viento de 10 m/s la velocidad del sonido es de 350 m/s a favor y 330 m/s en contra del viento. En otras palabras, cuando el medio en que se produce una onda se mueve frente al observador, la velocidad del medio se suma vectorialmente a la velocidad de propagación.

El medio de propagación de la luz era un misterio para la época porque los físicos no concebían propagación de ondas sin medio material: en parte tenían razón ya que en todos los casos conocidos hasta el momento había un medio que oscilaba en el tiempo y en el espacio produciendo el fenómeno ondulatorio. El aire era el medio del sonido. El parche de un tambor o la cuerda de guitarra eran los medios materiales asiento de las ondas de percusión o de rasgueo. Olas en mares y lagos se propagaban por la superficie del agua. Las ondas electromagnéticas no podían ser la excepción.

Pero los ópticos de fines de siglo no estaban acostumbrados al electromagnetismo: No hablaban de campos eléctricos y magnéticos como medios de propagación de ondas porque tenían una carga de muchos años de ondas luminosas desvinculadas de la electricidad (desde Huygens y Newton hasta Maxwell). Las ondas luminosas antes del electromagnetismo se suponían asentadas en el éter, medio material de propiedades casi mágicas: más tenaz que el acero para poder explicar la tremenda velocidad de la luz, más sutil que el aire enrarecido de la estratósfera puesto que no se notaba su presencia; infinitamente difusible en toda la materia del universo: bañaba todo y penetraba en los cuerpos transparentes. Pero faltaba lo peor......

Michelson pensó que la luz, al igual que un nadador en el río, iría más despacio en contra que a favor de la corriente del medio. No habría en cambio diferencia en un camino transversal al movimiento. Estuviera o no el éter fijo con respecto a algún punto del universo era claro que en algún momento el laboratorio fijo a la tierra debía moverse con respecto al éter, notándose un “viento de éter” detectable por una diferencia en la velocidad de la luz medida en la dirección de la velocidad de translación. Era imposible que de existir un medio de propagación éste acompañara siempre al experimentador. Inclusive si hubiera algún laboratorio privilegiado inmóvil con respecto al éter en algún momento, no duraría mucho esta condición ya que la tierra rota sobre si misma y describe una órbita en torno al sol. Debido sobre todo a este último movimiento la tierra tiene una velocidad lineal de 30 Km/s. alrededor del sol. Se sabía que a su vez el sol se mueve hacia una dirección determinada en la galaxia. Es muy razonable tratar de determinar el movimiento de la tierra con respecto al éter.

INTERFERÓMETRO DE MICHELSON EN REPOSO



Para ello Michelson hacía interferir dos rayos desdoblados de una misma fuente en caminos perpendiculares. Razonaba que la condición de interferencia se debía ver afectada cuando giraba el aparato 90°, permutándose así los caminos. Una diferencia de velocidad que importara un atraso o adelanto de un octavo de milésima de milímetro sería detectable en un camino de más o menos once metros, que era el largo de las ramas del aparato.

Debemos destacar aquí que dentro de los ópticos que se dedican a la interferometría, de por sí cuidadosos, Michelson era el colmo de la meticulosidad. Su aparato era un dechado de refinamiento, no podía encontrar la menor objeción y sus resultados eran inapelables.

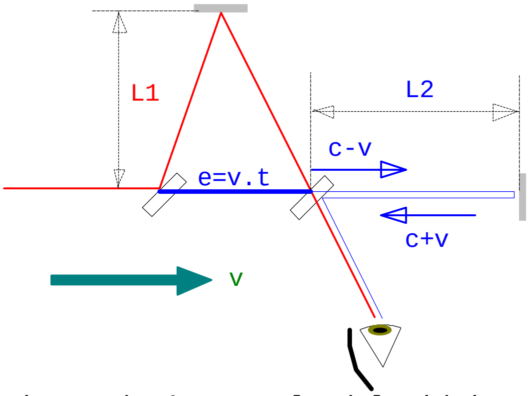
Qué sorpresa para todos cuando se giró el aparato y las franjas de interferencia estaban mas quietas que en una fotografía!...Si aunque sea se hubiera detectado un pequeño corrimiento, ya los físicos de la época hubieran respirado aliviados: era una cuestión cuantitativa que un retoque a las fórmulas podría explicar.

Pero no... no era cuestión de un poco más o un poco menos: el asunto era categórico: no había viento de éter en ninguna época del año, ni al nivel del mar ni en las cumbres ni en los sótanos. El medio no se movía con respecto a ningún observador.

Después de este balde de agua fría, que Michelson nunca pudo absorber, hubo algunos que se dedicaron a pensar del modo más frío y desapasionado que le permitieran sus corazones de físicos despechados.

Entre todos los que opinaron el físico holandés Hendrik Antoon Lorentz(1853-1928) en colaboración con el físico irlandés George Francis FitzGerald (1851-1901), fueron los más lógicos: Si una experiencia hecha para demostrar un fenómeno no lo acusa, o bien no se produce el fenómeno buscado o bien la experiencia está mal planteada.

El interferómetro no acusa el viento de éter, pensaron Lorentz y FitzGerald. ¿Y por qué? Razonemos nosotros como lo hicieron ellos:



Si el aparato está en movimiento a velocidad v (por ejemplo los famosos 30 Km/s) con respecto al éter, el rayo 1 recorre el camino que va y vuelve al espejo 1 en dirección perpendicular a la traslación. El rayo 2 hace lo propio: va y vuelve al espejo 2, pero va en contra y vuelve a favor del éter. Calculemos la longitud de los caminos recorridos por ambos rayos por el éter quieto sabiendo que la longitud de ambos brazos del interferómetro es la misma, o sea L, y que la velocidad de la luz con respecto al éter es c para ambos

El rayo 1 recorre un camino perpendicular al viento de éter. Sale del vidrio semiespejado y cuando llega al espejo 1 éste está un poco corrido hacia la derecha una distancia e. Vuelve hacia el vidrio y lo encuentra a 2e de la posición de salida. En definitiva el rayo recorrió dos veces la hipotenusa de un triángulo rectángulo de base e y altura L o sea la distancia $\mathbf{x=2.(e^2+L^2)^{1/2}}$ en un tiempo

$\mathbf{t_1= x/c = 2.(e^2+L^2)^{1/2}/c}$

Pero este tiempo es el que emplea el aparato en moverse una distancia 2e a la velocidad de traslación v , o sea que $t_1=2e/v$ y $e=v.t_1/2$

Así podemos poner que $\mathbf{t_1^2= 4.(e^2+L^2)/c^2 = (v^2.t_1^2 + 4.L^2) /c^2}$
de donde $t_1^2(1-(v/c)^2) = 4.L^2/c^2$ o sea $t_1^2 = 4.L^2/(c^2-v^2) = 4.(L/c)^2/(1-(v/c)^2)$
y de allí es $t_1 = 2.L/c/(1-(v/c)^2)^{1/2}$
Ahora bien, el rayo 2 recorre una distancia L en contra del viento de velocidad v , o sea a una velocidad c-v . Vuelve a recorrer esa distancia L a favor del viento, a velocidad c+v , de manera que emplea un tiempo $t_2 = L/(c-v) + L/(c+v) = 2.L.c/(c^2-v^2)$
Entonces resulta que $t_2=2.L/c/(1-(v/c)^2)$

LORENTZ

La acción transcurre en un gabinete de Física. Lorentz y un físico joven comentan animadamente el resultado de la experiencia de Michelson: El segundo dice:
- Evidentemente, profesor, este razonamiento nos ha llevado a la conclusión de que los tiempos que emplea la luz para recorrer los dos caminos no son iguales, por lo tanto deberían verse cambios en las franjas de interferencia.
- Y sin embargo la experiencia demuestra que no es así. Bien pudiera ser que para la luz los caminos fueran iguales. Deberíamos para ello forzar una igualdad entre t_1 y t_2 que no es tal en las fórmulas establecidas, a no ser que..... L no fuera igual en ambos miembros.
- ¿Cómo que no es igual? ¡El aparato se construyó con brazos exactamente iguales! ¿Pondríamos aún así en las fórmulas L_1 y L_2? .
- Si, dijo Lorentz. Aunque se verificó bien la igualdad de brazos, de alguna forma L_1 y L_2 no son iguales. Pondremos por ahora en las fórmulas, así....

Con su hermosa caligrafía, Lorentz escribió en el pizarrón lo siguiente:

$2.L_1/c/(1-(v/c)^2)^{1/2} = 2.L_2/c/(1-(v/c)^2)$

El joven tomó otra tiza y completó el trabajo algebraico, despejando L2, así:

$L_2=L_1(1-(v/c)^2)^{1/2}$, y se quedó mirando la fórmula mientras Lorentz decía:

-Como Vd. ve estimado muchacho, L_2 es menor que L_1 , ya que la cantidad entre paréntesis es menor que la unidad. La velocidad de traslación del aparato, o si Vd. quiere la velocidad del viento de éter **v**, es siempre mucho menor que la velocidad de la luz **c** así que el paréntesis es un poco inferior a la unidad. A nivel de velocidades **v** pequeñas la diferencia entre L_1 y L_2 es pequeñísima, ... pero existe.
- Veo bien eso, profesor Lorentz, pero entonces ¿cuando se permutan los caminos girando el aparato, L_1 pasa a ser L_2 y viceversa?
-No, No... dijo Lorentz. Si fuera así, tendríamos corrimiento de franjas. En realidad L_1 es siempre la longitud del brazo perpendicular al viento y L_2 la del que va en la dirección del movimiento.
-Entonces el aparato se deforma cuando se gira 90 grados, acortándose en la dirección del movimiento!...
-Brillante deducción joven!.. Si,... parece que así debería ser...- dijo Lorentz.
-No creo que a muchos les guste admitir eso, profesor. Me parece que vamos a ser duramente criticados si proponemos esta solución. Parece una solución hecha a medida sólo para justificar el resultado negativo del experimento de nuestro colega Michelson.
- Soy consciente de ello. Yo mismo no estoy muy conforme, pero acaso ¿se le ocurre algo mejor?.

Después de pensar un momento, Lorentz prosiguió hablando animadamente:
- Vd. dice, y no lo culpo, que es una solución “ad hoc”. Sin embargo no es tan así: ¡Tenga en cuenta que la materia está formada de partículas, la mayoría de ellas con carga!. Tome por ejemplo a los electrones que tanto abundan en la sustancia de todos los objetos.... Los electrones tienen carga y masa, pero mucha más carga que masa. ¿Qué tal si este carácter eléctrico de la materia está ligado a esta contracción?
- ¿Quiere decir Vd. que el viento de éter ejerce presión sobre la materia y la acorta en el sentido del movimiento? - preguntó el físico joven, que además era inteligente.
- Es una idea, o mejor dicho una explicación ingeniosa.
Ahora más animado por la lisonja de Lorentz, el joven dijo:
- Habría que probar con aparatos que no tuvieran tantos electrones como el de Michelson, que estaba sobre bastidores de piedra. La piedra tiene muchos átomos metálicos y los metales tienen muchos electrones, no es cierto?....
Lorentz lo miró dubitativo. El otro siguió:
- ¿Y si se fabrica un interferómetro sobre bastidor de material no metálico, digamos de madera?
- Puede probar Vd. Yo no me gastaría. Algo me dice que el asunto no va por ahí... No.., no va a andar..... Me atrevo a asegurar que la luz, mientras es luz, es una onda que acusa siempre la misma velocidad para cualquier observador.
-¿Quiere decir que si Vd. y yo medimos la velocidad de un mismo rayo de luz, Vd. en este laboratorio y yo en algún vehículo que pasa raudo a su lado, los dos medimos 300000 Km/s?
- Estoy casi seguro de ello, sino el resultado del experimento de Michelson-Morley sería otro.

Suspendemos por ahora el diálogo entre Lorentz y su discípulo para decir que éste experimentó con un aparato sobre armazón de madera muy sólido, que le costó bastante trabajo y dinero. Pero tampoco observó cambios en las franjas.

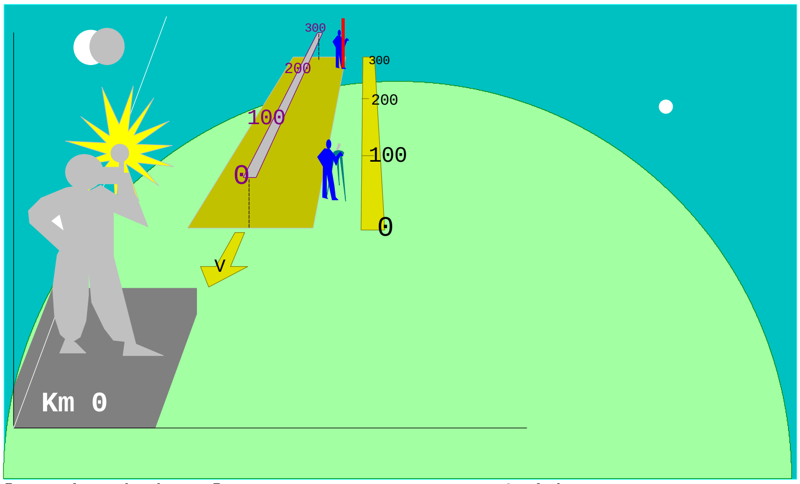
Diremos también que nadie encontró algo mejor que proponer hasta nuestros días que esa contracción de toda la materia en contra del viento de éter que propuso Lorentz, que fue premio Nobel de física 1902 pero no por su genial interpretación del experimento de Michelson junto a FitzGerald, sino por su explicación de un fenómeno luminoso descubierto por Pieter Zeeman, otro holandés que compartió con Lorentz el galardón de ese año.

¿Se puede "ver " la contracción del espacio?

Lo que molestaba a algunos físicos era que la contracción de Lorentz fuera indetectable con medios ópticos desde adentro del propio sistema en movimiento, ya que los metros o reglas de medición adosadas también se contraen junto al objeto.

¿Sería observable el efecto desde afuera del sistema en movimiento, por ejemplo por un observador privilegiado fijo en el universo, que viera pasar a su lado a la tierra con sus laboratorios, sus físicos y sus aparatos?

Pongamos en marcha la imaginación: Estamos en un laboratorio fijo al centro del universo. La tierra se mueve hacia nosotros. Sobre la tierra vemos un grupo de topógrafos que mide la longitud de una pista con una regla apoyada en el suelo. Vemos que el cero de su regla coincide con el extremo próximo de la pista y que el otro extremo coincide con la división N°300. -¡Ajá!, -decimos-, Midamos con nuestra propia regla fija la pista en movimiento!.



Nuestra regla está quieta y no sufre contracción, en cambio la regla de los topógrafos seguramente está contraída por la velocidad. No es fácil medir la longitud de algo que se mueve rápido con un metro fijo. Hay que sacar una foto de la pista moviéndose y de nuestra regla justo cuando un extremo del objeto coincide con el origen de la misma. Revelamos la foto y vemos que mide efectivamente 300. ¿Cómo no detectamos la contracción? Porque la pista viene hacia nosotros y la foto es instantánea: toma el extremos próximo a nosotros en el momento en que pasa por el origen de la regla y también toma en ese mismo instante la imagen que llega desde el extremo alejado de la pista que se acerca, pero ese extremo está en realidad más cerca de nosotros que cuando la luz llegó a la placa.

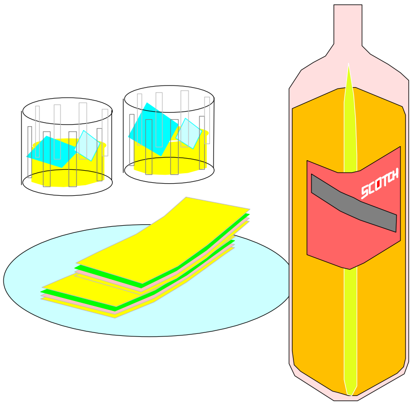
La contracción queda compensada exactamente por el retraso de la luz que llega del extremo lejano. En otras palabras, la contracción de Lorentz es **indetectable por medios ópticos** tanto desde el sistema en movimiento como desde el sistema fijo.

¿Habrá otros medios que no sean ópticos?. Desgraciadamente, la luz es el medio de observación y detección de fenómenos más rápido y efectivo que se conoce. ¿Cómo estudiar sin observar?. Observar es mirar...con luz, por supuesto. Así que mientras la observación visual o en general electromagnética sea el medio de juzgar la realidad, no podremos "ver" la contracción de Lorentz.

KUNZ- Una conversación informal

Saltemos en el tiempo algunas décadas y escuchemos la interesante postura que tenía al respecto un científico argentino y primo mío, el ingeniero Alfredo Luis Kunz.

Corre el año 1975. En una reunión familiar en lo de Papá, Kunz me confía que tiene pensado disertar próximamente sobre el tema de la velocidad de la luz en rueda de amigos:



- Me parece que el asunto de la constancia de la velocidad de la luz tiene una explicación muy conveniente, querido Américo.
- Mira, Fredy, para mí sigue siendo un asunto confuso. He estudiado la relatividad de Einstein y...
- No hay relatividad que valga, Américo. No pasa la cuestión por la relatividad, que yo también he estudiado y me parece perfecta. En cambio es más sencillo el asunto: la luz es por definición lo que impresiona nuestra vista, ¿no?
- Si, bueno,- admití,- y lo que impresiona nuestras fotografías, nuestros receptores de radio y radiotelescopios, para ser más amplios.
- Acertado, -dijo comiéndose un saladito. Y prosiguió:
- La luz está compuesta de partículas u ondas, como quieras, con velocidad c=300000 Km/s. Para mí es claro que si no tienen esa velocidad, corpúsculos u ondas no son luz sino otra cosa. ¿Qué te parece?
- Crees que hay partículas de mayor velocidad aún? ¿Y de menor velocidad?
- De menor velocidad seguro, y de mayor velocidad no lo sé. Las primeras o las segundas, si las hay, no serán luz sino otra cosa, y no se “verán” en el sentido estricto de la palabra.
- ¿Crees que podrían detectarse de alguna forma?

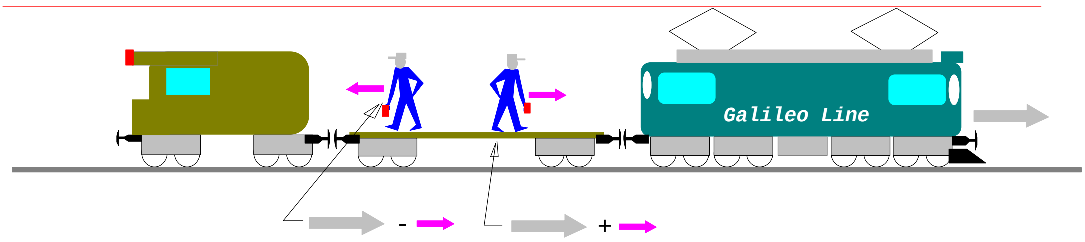
Una fuente de triples pasó a nuestro lado a velocidad mucho menor que **c**, por lo que pude verla y detenerla a tiempo.
- Humm!.. No se me ocurre por ahora, - dijo Kunz alargando la mano.

Aún yo no había reflexionado lo suficiente sobre estas cuestiones y en ese momento no me di cuenta del valor del pensamiento de mi querido primo, que murió años después sin haber publicado nada al respecto, que yo sepa.

El enfoque de Kunz es esclarecedor: la radiación electromagnética o los fotones correspondientes, dos aspectos de una misma cosa, son evidentemente inseparables de su velocidad única y característica **c=300000 Km/s** en el vacío. Aún desde el punto de vista matemático las ondas electromagnéticas no pueden escribirse con otro valor de velocidad, a riesgo de que no sean ondas en absoluto para el observador en cuestión.

LORENTZ, PARTE II

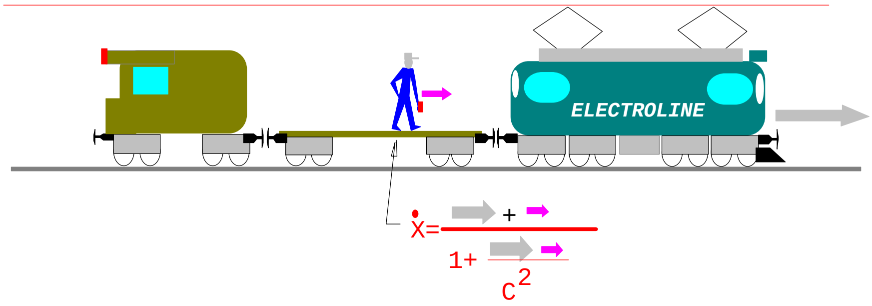
La experiencia de Michelson enseñó que el éter no arrastra a la luz, que no era válido suponer que el rayo sumaba o restaba su velocidad a la del éter. Sin embargo, en mecánica se admitía desde Galileo, que la velocidad de arrastre se sumaba a la del móvil arrastrado: Un pasajero que caminaba hacia la locomotora sumaba su velocidad a la del tren y la restaba si iba hacia el furgón. Si x era la distancia entre Constitución y un punto de la vía alcanzado en el tiempo t por el tren, según Galileo, la distancia x’ del pasajero caminante a velocidad v



TEOREMA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES DE GALILEO era $x'=x+vt$. A esta ecuación se la llama transformación de coordenadas de Galileo. La velocidad del pasajero era el fluxión de la suma x+vt o sea la suma de los fluxiones, según las reglas del cálculus:

$\dot{x}'=\dot{x}+v$, que es la suma de velocidades del pasajero y del tren.

Algún físico de la época estudió qué pasaba con la luz en medios en movimiento: Un haz de luz se hacía pasar por un tubo por el que circulaba benceno a gran velocidad. La velocidad de la luz en el benceno, bastante menor que en el vacío, aumentaba a favor del chorro y disminuía cuando iba en contra. Pero el aumento no salía de una suma o resta sencillas entre la velocidad del chorro y la de luz en el benceno quieto. La explicación estaba de acuerdo con la ecuación de la contracción de Lorentz:



TEOREMA DE ADICIÓN DE VELOCIDADES ELECTROMAGNÉTICO

La distancia x' de la fórmula de Galileo se modificaba con la contracción en la dirección de velocidad v del chorro según la ecuación $x'.(1-(v/c)^2)^{1/2}=(x+vt)$ o bien:

$$x'=(x+vt)\ /(1-(v/c)^2)^{1/2} \quad (1)$$

Si hallamos el fluxión de x' según la fórmula anterior **no** saldrá la suma de velocidades como antes, sino una expresión modificada con un denominador mayor que la unidad, vale decir que el resultado es menor que la suma tal como lo avala la experiencia del chorro: $dx'/dt'=(dx/dt+v)/(1+v.dx/dt/c^2)$

UNA CUESTIÓN DE TIEMPO

Haciendo un ejercicio de álgebra elemental deducimos de la (1) que debe ser:

$$x=x'.(1-(v/c)^2)^{1/2}-vt \quad (2)$$

Si la (2) fuera cierta podríamos distinguir dos tipos de sistemas: los directos, con transformaciones tipo (1) y los inversos con transformaciones tipo (2)

Pero la experiencia reconoce sólo sistemas equivalentes que emplean fórmulas de tipo (1).

Es decir que si para pasar de la distancia x' a la nueva distancia x en el otro sistema a velocidad v se usa una fórmula determinada, para pasar de x a x' debe usarse una fórmula simétrica (con v=-v ya que la velocidad entre ambos sistemas cambia de sentido según se considere el observador en uno o en el otro), del tipo

$$x=(x'-vt)\ /(1-(v/c)^2)^{1/2} \quad (3)$$

Obviamente la (3) no sale de la (1), a menos que la forcemos la ecuación mediante un cambio de variables, como hicimos cuando impusimos la igualdad de los brazos del interferómetro. Ahora es algo parecido: para que (3) salga de (1) algunas de las variables t o v deben cambiar por t' o v'

Que la velocidad de arrastre sea diferente en un sistema con respecto al otro, salvo el signo, parecía disparatado por el carácter de velocidad relativa: si me muevo a 20 Km/h de un punto, el punto se aleja a 20 Km/h de mi y yo me alejo de él a la misma velocidad.

Que el tiempo t sea diferente en ambos sistemas contraría el concepto de tiempo como variable independiente y absoluta. Sin embargo, alguien tenía que pagar los platos rotos, y Lorentz eligió a la variable t para diferenciar ambos sistemas, poniendo:

$x = (x' - vt')/(1-(v/c)^2)^{1/2}$ (4)
$x' = (x + vt)/(1-(v/c)^2)^{1/2}$ (1)

De (1) y (4) sale **$t' = (t + vx/c^2)/(1-(v/c)^2)^{1/2}$ (5)**
$t = (t' - vx'/c^2)/(1-(v/c)^2)^{1/2}$ (6)

¿Qué significaba t'? Prudentemente Lorentz no se atrevió a llamar tiempo a t', reservando ese nombre para la variable t de un sistema en reposo, en cuyo caso **v** era la velocidad absoluta de traslación del sistema en movimiento absoluto.

A t' lo llamó **tiempo local** del sistema en movimiento: algo que había que colocar en lugar del tiempo para que funcionaran las ecuaciones transformadas. Yo lo he bautizado "tiempo electromagnético" ya que es el que marcan los relojes que funcionan en base a fenómenos de radiación electromagnética a nivel atómico, por otra parte los más exactos que se conocen. Pero este hecho no se conocía en tiempos de Lorentz, quién suponía erróneamente que un reloj seguiría marcando t en cualquier sistema, y que t' era meramente una variable que no representaba ninguna magnitud física.

Las ecuaciones anteriores nos dicen que el tiempo electromagnético de un sistema en reposo coincide con el tiempo absoluto t. En cambio difiere de él cuando el sistema se mueve a velocidad absoluta v. Además no es el mismo en diferentes lugares, ya que depende de la distancia al origen x del punto considerado.

Lorentz fue extremadamente cuidadoso en no llamar tiempo a secas a la variable t' ya que estaba convencido que el tiempo es una variable independiente y absoluta por definición. También consideraba que había un sistema en reposo absoluto, respecto al cual podía definirse la velocidad absoluta de otro sistema, por más que no se diera por el momento el caso de determinar su origen. Newton, con la extraordinaria intuición que lo caracterizó, había considerado en su época un sistema absoluto con origen en un grupo de estrellas fijas en el firmamento.

EINSTEIN

El electromagnetismo no necesitaba de un sistema absoluto pues que desde cualquier sistema se podían describir movimientos en cualquier otro con ecuaciones simétricas. Así que si bien intelectualmente algunos mantenían las ideas de tiempo y espacio absolutos, a fuerza de usar la física electromagnética otros fueron olvidando estos conceptos hasta que Einstein, en 1914, impuso como prácticamente única la representación electromagnética de los fenómenos físicos a través de las ecuaciones de Lorentz, a las que dio un nuevo significado que trascendía el mero modelo físico para erigirse en la realidad misma.

Einstein estuvo en un principio influido por las ideas filosóficas de Ernst Mach, que sostenía que una teoría física debe apoyarse fundamentalmente en hechos ciertos experimentales. Sin embargo ya vimos que este brillante hombre de ciencia, Ernst Mach, tuvo una idea fecunda sobre el origen de la masa inercial que no estaba fundamentada en experiencia alguna sino en brillante elucubración mental.

Por eso sostengo que: ***En ciencia y en física en particular hay que guiarse por la experiencia, pero también hay que ser receptivo a las sugerencias del Supremo a través de la armonía de su creación: Por algo Él nos muestra las estrellas fijas en el cielo. Por algo las ecuaciones termodinámicas hablan de un instante de entropía nula. Por algo en nosotros están las ideas de tiempo y espacio absolutos. Conviene que los modelos no contradigan gratuitamente nuestra intuición natural. A veces hay que cerrar el laboratorio y soñar un poco.***

Vimos que el electromagnetismo no necesita del espacio y tiempo absolutos y a lo sumo pueden considerarse atributos de un sistema más entre todos los sistemas que vagan en distintas direcciones a velocidad relativa constante.

El sistema absoluto, para el que no hay ecuaciones especiales y que por lo tanto es indistinguible en este modelo electromagnético, es sin embargo una posibilidad intelectual que trasciende el electromagnetismo. Por ejemplo es muy útil en cosmología y en astronomía.

Los científicos y los físicos en particular no son gente aislada del mundo de la política, de la religión o de las ideas filosóficas, éticas y morales de la época. Sus teorías nacen, crecen, se desarrollan y modifican al son de esas variables “sociales”. Albert Einstein no fue una excepción. Al contrario, fue un ejemplo cabal de ello. Por ser alemán de origen judío sufrió la persecución del régimen nazi y el exilio, con las penurias e inconvenientes pero también con la compensación del reconocimiento y aceptación del mundo libre, que lo hizo su sabio mimado. Sus estudios sólidos unidos a una inteligencia muy viva y tenacidad propia de su raza, lo llevaron a dominar la cuestión del electromagnetismo, que aprendió de los trabajos de Maxwell y Lorentz. Con una inclinación innata por la geometría, estudió luego matemáticas tensoriales, herramienta de excepcional potencia en física y en electromagnetismo, perfeccionada a la sazón con los trabajos de los matemáticos Levi-Civita y Hermann Minkowski

Paradójicamente Einstein recibió el premio Nobel por trabajos de física cuántica (efecto fotoeléctrico y movimiento browniano) y no por lo que lo hizo más famoso: su Teoría de la Relatividad, que versa sobre cuestiones electromagnéticas y está desvinculada de la micro-física de partículas y cuántos.

El enfoque que hizo Einstein sobre el electromagnetismo de Lorentz tuvo dos aspectos: el formal y el filosófico.

El aspecto formal se caracterizó por el uso de herramientas matemáticas muy sofisticadas. La relatividad de Einstein es absolutamente hermética si no se conoce cálculo tensorial. Para mis queridos estudiantes, les diré que el cálculo tensorial nació del estudio de la resistencia de materiales, así como el cálculo vectorial es hijo del estudio de las fuerzas (estática). Un tensor es un ente matemático que representa el estado de esfuerzo en el seno de un cuerpo cargado, pero también representa una transformación de coordenadas o una superficie de segundo grado (una cuádrica). Así como un vector está formado por componentes escalares dispuestas en columna, un tensor se compone de vectores y por lo tanto es representable por una matriz o tabla cuadrada. Se define toda un álgebra tensorial, con operaciones como la suma y multiplicación entre tensores. Se reconocen rangos entre los tensores, así como se reconocen dimensiones en los vectores.

Lo interesante en física es que una ley expresada en forma tensorial no cambia su forma al variar los ejes de referencia o como se dice “el sistema de coordenadas”. Por supuesto, en mayor grado aún que con los vectores, los tensores permiten una economía tremenda en la expresión de leyes y fórmulas.

Pero, eso si, hay que estar acostumbrado a usarlos para comprender el significado físico de una ley expresada tensorialmente.

El aspecto filosófico de la relatividad se puede explicar sobre su esqueleto conceptual, que no es otro que el electromagnetismo de Lorentz: Las mismas fórmulas con distinta interpretación.

Por ejemplo para Lorentz la fórmula $\mathbf{x'=(x+vt)\ /(1-(v/c)^2)^{1/2}}$ significa que para pasar de la coordenada x en un sistema en reposo a la coordenada x′ en un sistema en movimiento a velocidad absoluta v debemos efectuar las operaciones que se indican.
La variable t es el tiempo absoluto, según la concepción clásica.
Si quisiéramos pasar del sistema en movimiento al sistema en reposo usaríamos la transformación inversa $\mathbf{x=(x'+vt')\ /(1-(v/c)^2)^{1/2}}$, donde t′ es el tiempo local del sistema en movimiento, obtenido con una transformación del tiempo real a través de la fórmula $\mathbf{t'= (t+ vx/c^2)\ /(1-(v/c)^2)^{1/2}}$

En cambio Einstein escribe la fórmula anterior casi igual,
$\mathbf{x_2=(x_1+v_r.t_1)\ /(1-(v_r/c)^2)^{1/2}}$
y lee que para pasar de la coordenada x_1 en un sistema cualquiera (digamos el Nº1) a la coordenada $\mathbf{x_2}$ en el sistema Nº2 en movimiento a velocidad relativa $\mathbf{v_r}$ con respecto al primero, debemos efectuar las operaciones que se indican en la fórmula.
La variable $\mathbf{t_1}$ es el tiempo que marcan los relojes a bordo del sistema Nº1
Si se desea pasar de x_2 a x_1 se emplea la fórmula inversa a la anterior, a saber:
$\mathbf{x_1=(x_2-v_r.t_2)\ /(1-(v_r/c)^2)^{1/2}}$
La variable $\mathbf{t_2}$ es el tiempo que marcan los relojes a bordo del sistema Nº2

¿Dónde está la diferencia?: En lo que representan x y t. Antes de Einstein x es el espacio de la geometría de Euclides, t es el tiempo de Newton.
Después de Einstein x es la coordenada medida con una regla a bordo del sistema. La variable t es lo que mide un reloj a bordo del mismo sistema. Espacio y tiempo son para Einstein variables en cuanto puedan ser definidas en base a sus respectivas mediciones.

Esta es la base de la teoría de la relatividad restringida. Se llamó así porque estaba restringida a la física de sistemas inerciales, es decir sistemas donde no operaban fuerzas de gravitación y que poseían velocidad relativa constante entre sí.

LA RELATIVIDAD CLÁSICA
Desde Newton la física enunciaba el principio de relatividad de la mecánica clásica, a saber: No es posible determinar mediante experimentos mecánicos si un sistema está fijo o se mueve con velocidad constante: Si tiramos hacia arriba una pelota, esta cae en nuestras manos ya sea que estemos parados en la estación o ubicados en un tren en marcha a velocidad constante. Ello era equivalente a afirmar que las leyes de la mecánica son invariantes en todos los sistemas inerciales. Para pasar de un sistema inercial a otro, la mecánica clásica empleaba las transformaciones de Galileo, que vimos eran de la forma $\mathbf{x'= x \pm v.t}$ (El signo + o el - corresponden respectivamente a acercamiento o alejamiento de los sistemas entre sí)
Las transformaciones de Galileo eran lógicas e intuitivas, como la geometría Euclideana, de las que derivaban. El fluxión de la expresión $x=x\pm v.t$ nos lleva al teorema de la adición de velocidades de Galileo. De una nueva aplicación del fluxión se obtiene:

$\ddot{x}'=\ddot{x}$, que nos dice que la aceleración en ambos sistemas no solo tiene la misma forma matemática sino que vale numéricamente lo mismo.

Pero las transformaciones de Galileo no se llevaban bien con los fenómenos electromagnéticos. El teorema de la adición de velocidades de Galileo no funcionaba para la luz, que parecía desafiar la lógica al caminar siempre a velocidad constante aún para dos observadores que se movían entre sí. Evidentemente el principio de relatividad se extiende también al electromagnetismo y debemos decir ahora: No es posible determinar mediante experimentos mecánicos ni ópticos si un sistema está fijo o se mueve a velocidad constante.

Como ya se vio se debieron modificar las transformaciones de Galileo dividiéndolas por $(1-\beta^2)^{1/2}$ (con $\beta=v/c$) e inventar el tiempo local para que se adaptaran al electromagnetismo. En particular estas nuevas transformaciones de Lorentz mantenían la forma de las ecuaciones de onda derivadas de las ecuaciones de Maxwell, y por lo tanto el término de velocidad seguía siendo en todos los sistemas inerciales $\mathbf{c=1/(e.m)^{1/2}}$ de acuerdo a lo que dice la experiencia: la luz tiene velocidad constante para cualquier observador. También estaban de acuerdo con los resultados experimentales al estudiar la adición parcial de velocidades grandes (experiencia del haz luminoso en el chorro de benceno a gran velocidad).

Después de Lorentz, la física amplió el principio de relatividad de la mecánica al electromagnetismo: No existen experiencias ni mecánicas ni electromagnéticas posibles para detectar si un sistema está fijo o se mueve con velocidad constante.

Así que las transformaciones de Lorentz quedaron instaladas en la mecánica, dándole algunas características finas muy especiales. Características que no se aprovechan en las aplicaciones ordinarias o de mecánica celeste, cuando β es despreciable. Allí conviene seguir usando las de Galileo, que pasan a ser un caso particular de las de Lorentz para $\beta=0$. Pero en el mundo de las micropartículas subatómicas se lidia por ejemplo con electrones a velocidades enormes: un electrón acelerado con un millón de volt tiene una velocidad cercana a la de la luz. Allí es indispensable usar transformaciones de Lorentz y sus consecuencias inmediatas: el nuevo teorema de adición de velocidades ya visto, y la variación de la masa con la velocidad que explicaremos a continuación.

ELECTRÓN DE LORENTZ - MASA Y VELOCIDAD

MASA ELECTROMAGNÉTICA CLÁSICA:

El estudio clásico de la electricidad indica que una carga en movimiento, o una corriente de convección, tiene un campo magnético asociado: esto lo saben bien mis alumnos de quinto año. Que ese campo magnético se extiende en todo el espacio que rodea a la corriente también es sabido. Y se conoce también que el campo magnético posee una energía asociada por unidad de volumen, que vale $\mu.H^2/2$.

Resulta lógico pensar que esa energía proviene del movimiento de la carga. Lo bueno del caso es que el cálculo indica que la energía es proporcional al cuadrado de la velocidad de la carga, igual que la energía cinética de una partícula, en cuyo caso la constante de proporcionalidad vale la mitad de su masa: nos referimos a la conocida fórmula $\mathbf{E_{Cinética}=1/2.m.v^2}$

Ahora bien, si la energía de una carga en movimiento es proporcional al cuadrado de la velocidad, resulta lógico pensar que la constante de proporcionalidad, que tiene dimensiones de masa inercial, se puede asimilar a la mitad de una masa que por provenir de una carga pura (y no de un objeto con masa inercial cargado de electricidad) se puede denominar “masa electromagnética”. Su valor es proporcional al cuadrado de la carga q e independiente de la velocidad, según la expresión:

$\mathbf{M_{el}=m.q^2/(6.p.r_o)}$, donde r_o = radio de la esfera donde se supone reside la carga q ;

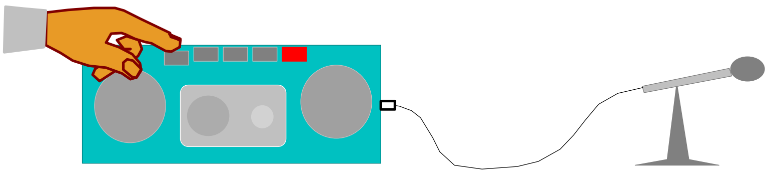
μ es la permeabilidad magnética del medio

MASA ELECTROMAGNÉTICA DE LORENTZ:

La deducción del concepto de masa electromagnética asociada a una carga en movimiento que arroja la fórmula vista no está planteada incluyendo a la velocidad de la luz como la velocidad de establecimiento o propagación del campo magnético: en efecto, la ley de Biot-Savart empleada para calcular el campo magnético en un punto alejado de la corriente eléctrica que le daba origen, suponía un estado estacionario.

Lorentz extendió la deducción de la masa electromagnética tomando en cuenta la velocidad de propagación del campo igual a la de la luz c para cualquier observador, y obtuvo una expresión de la masa electromagnética dependiente del cuadrado de la carga pero también de su velocidad de traslación.

UNA HISTORIA PARA INICIADOS: La dinámica de la Física electromagnética



El párrafo que sigue, reproducción de una grabación de una clase dada en la Facultad de Ingeniería, será comprendido cabalmente por físicos o estudiantes avanzados. Sin embargo, el lego puede sacar provecho de su lectura a través de la explicación de las fórmulas que realiza el profesor.

Apretemos “PLAY” y escuchemos:

El profesor AD entra en un aula bulliciosa, saluda y pide silencio.

Ejem! Buenas Tardes.... (Cesan las conversaciones)

Comienza la clase: Mientras escribe dice: - La ecuación vectorial de la dinámica clásica $\boldsymbol{f}=d(m\boldsymbol{v})/dt$ (Atención muchachos, las ***negritas inclinadas*** son vectores).

- Por definición, la velocidad es $\boldsymbol{v}=d\boldsymbol{r}/dt$ ($\boldsymbol{r}$ es el vector posición de la partícula).

- En un sistema en movimiento resulta que $\boldsymbol{f}=d(m\boldsymbol{v}')/dt$, con $\boldsymbol{v}'=\boldsymbol{v}+\boldsymbol{v}_o$ (suma de velocidades de la partícula y del móvil) es decir que la fuerza tiene la misma expresión en ambos sistemas. ¿Cómo podemos expresar elegantemente este concepto, alumnos?

Algunos corean: ¡La fuerza es invariante a través de una transformación de Galileo!

Satisfecho con esta muestra de comprensión, AD continúa:

- Bien, bien!...Si definimos la masa como la relación entre fuerza aplicada y aceleración obtenida, la masa m en la mecánica de Newton es aparentemente una constante, aunque no estamos autorizados a decir que vale lo mismo en un sistema de coordenadas que en otro, ya que la invariancia en la forma de una ecuación no es condición suficiente para la igualdad numérica.

- Atención: ahora aplicamos las transformaciones de Lorentz a la ecuación anterior, con t′=tiempo local de Lorentz, o como yo lo llamo, tiempo electromagnético del sistema en movimiento. $\boldsymbol{r}_o=\boldsymbol{v}_o.\boldsymbol{t}'$ es la posición del origen de coordenadas del sistema móvil.

$\boldsymbol{r}'=\boldsymbol{r}_o+\boldsymbol{r}/(1-\beta^2)$ $\qquad$ $\boldsymbol{v}'=d\boldsymbol{r}'/dt'$ $\qquad$ $\boldsymbol{v}_o=d\boldsymbol{r}_o/dt'$ $\qquad$ $\boldsymbol{f}'=d(m.\boldsymbol{v}'/dt')$

con $\boldsymbol{v}'= d\boldsymbol{r}'/dt'=(\boldsymbol{v}+\boldsymbol{v}_o)/(1+\boldsymbol{v}.\boldsymbol{v}_o/c^2)$ (teorema de adición de velocidades modificado)

- Lorentz dedujo matemáticamente que la relación entre fuerza y aceleración, que es constante en la mecánica de Newton, ahora es **variable con la velocidad v_o de traslación del sistema.** Ojo que $\boldsymbol{v}_o$ es vectorial y por lo tanto puede tomar cualquier dirección con respecto a la de la aceleración $\ddot{\boldsymbol{r}}' = d\boldsymbol{v}'/dt = d^2\boldsymbol{r}'/dt'^2$ ¿Está claro?

Se escuchan algunos “si, si” entre los alumnos.

- En particular si consideramos que la fuerza es **perpendicular** a la velocidad de traslación del sistema v_o, entonces se deduce (los invito a hacer el ejercicio, emulando a Lorentz en su obra “Teoría del Electrón”) que la relación $\boldsymbol{f}'/(d^2\boldsymbol{r}'/dt'^2)$ vale:

$\mathbf{m_t=m_o/(1-b^2)^{1/2}}$ (m_t se llama masa transversal variable con la velocidad)

Si en cambio consideramos que la fuerza es **paralela** a la velocidad de traslación del sistema $\boldsymbol{v_o}$, entonces sale:

$\mathbf{m_l=m/(1-b^2)^{3/2}}$ (m_l se llama masa longitudinal variable con la velocidad)

F, una estudiante bajita que siempre seguía las clases atentamente, pregunta:

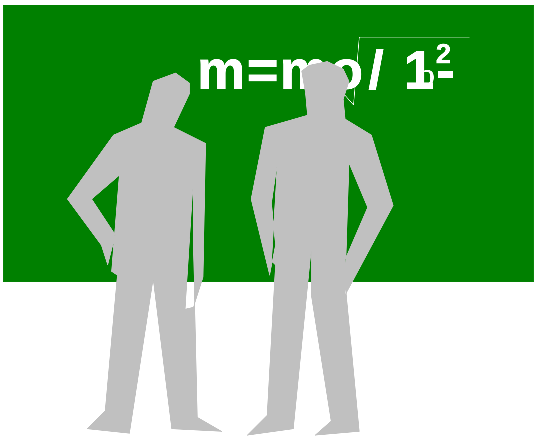
- ¿Por qué hablar de masa transversal o longitudinal? ¿No es que la masa varía en forma continua con la velocidad de translación y su dirección?

- Exactamente, estimada F, pero se trata de escribir dos casos límites entre todos los posibles, que son los más usados en muchas aplicaciones. Por ejemplo cuando se estudia el aumento de masa de electrones a gran velocidad se estudia su masa transversal. Para determinar la masa los electrones de un mega electrón volt de energía se desvían con campos magnéticos que crean una fuerza perpendicular a la dirección de la velocidad de las partículas cargadas: del radio de la trayectoria circular resultante se calcula la masa...- AD se interrumpió y esperó que F completara la frase con la palabra que faltaba -...transversal!

Murmullos...(La grabación termina en este punto)

UNA CHARLA ACADÉMICA

La acción transcurre en el año 1990, en la sala de profesores de una Facultad de Ciencias. Dos profesores charlan sobre la variación de la masa con la velocidad, que Lorentz publicó en su “Teoría del Electrón” alrededor de 1900.



El más viejo, Quique, le dice al más joven, Saúl:
- Mirá, Saúl, sin necesidad de las deducciones de Lorentz, que la masa electromagnética depende de la velocidad sale también de hallar el fluxión de la cantidad de movimiento en el caso de una radiación de masa m y velocidad c, que en mecánica nos da la fuerza.
- ¿Ah, si? ¿cómo es eso?
Quique toma una tiza y escribe mientras habla:
- Según la mecánica clásica de Newton es $d(mv)/dt=m.dv/dt+v.dm/dt$=fuerza. Si consideramos que la masa m no es variable entonces resulta la clásica fórmula
fuerza=$m.dv/dt$= masa x aceleración
- Ajá, dice Saúl.
- Ya vimos que a través del estudio de la presión de radiación existe una equivalencia entre energía radiante y masa asociada a través de la fórmula $E=mc^2$, que fue dada explícitamente por primera vez por Einstein en su Relatividad restringida.
- Me gustó tu explicación del otro día, me acuerdo de ella.
Alentado por ese comentario, Quique prosiguió:
- Si interpretamos que E es la energía radiante transformada en cinética (en la paleta del molinete), podemos aplicarle las fórmulas de Newton y su famoso cálculus:
- Ah! el omnipresente Newton otra vez!..- dijo por lo bajo Saúl
Quique puso: $dEc =d(mv)/dt.dx$, y sentenció como dando clase:
- Fórmula que expresa que el trabajo de una fuerza se traduce en variación de energía mecánica. Hasta ahora estamos con Newton...., Saúl. Éste asintió con la cabeza, sintiendo que el espíritu del sabio inglés estaba en la sala.
- Luego ponemos $dE_c=d(mc^2)= c^2.dm$: esta es una relación puramente electromagnética, que mezclaremos temerariamente con la anterior, dijo Quique guiñando un ojo a Saúl.

- (Newton nos perdone!..), pensó Saúl, que era un poco supersticioso.
Sául vio como Quique escribía lo siguiente, e imaginó el ceño fruncido de don Isaac:

$$dE_c=d(mv)/dt.dx=d(mv).v=c^2.dm$$

- Pero $d(mv)=v.dm+m.dv$, entonces podemos poner $v^2.dm+m.v.dv=c^2.dm$
y entonces sacando factor común dm resulta: $dm(c^2-v^2)=m.v.dv$, y a ti dejo la integración de esto, amigo Saúl.
Y Saúl, buen conocedor del cálculus, integró con presteza:
$dm/m=v.dv/(c^2-v^2)$ de donde $\ln(m) = K-1/2.\ln(c^2-v^2)$
Y agregó: - La constante de integración K sale de condiciones iniciales. ¿Qué te parece si la calculamos para v=0, es decir para reposo?
- Perfecto! -dijo Quique.
Saúl prosiguió escribiendo: $K = \ln(m_o)+ 1/2.\ln(c^2) = \ln(m_o.c)$
- Ah!... veo que eres inteligente y has puesto $m=m_o$ para $v=v_o$. ¿Y qué te parece que puede ser físicamente m_o ?- preguntó Quique.
- No me subestimes, Quique, m_o es la masa cuando el sistema a la que pertenece está a velocidad nula, o sea que podemos llamarla “masa en reposo”- dijo Saúl con suficiencia.
- ¡Me descubro y hago una reverencia ante tanta sabiduría y buen sentido! - Y Quique se inclinó pesadamente hacia adelante junto con el ademán de sacarse un imaginario sombrero.
- No tanta reverencia, que ya termino. Ahora reemplazo K -dijo Saúl- , escribiendo la fórmula siguiente:
$\ln(m)=\ln(m_o.c)-\ln(c^2-v^2)^{1/2}$, y aplico antilogaritmos en ambos miembros y queda...
(usando β=v/c) $m=m_o/(1-b^2)^{1/2}$
- Lo que indica que la masa a velocidad v es mayor que la masa en reposo - corearon Quique y Saúl, satisfechos.
- Perdón, profesores!..- La áspera voz de un ordenanza los sacó del éxtasis científico- Debo limpiar y cerrar la sala. Son las once de la noche...
- Cuánta incomprensión - pensaron los físicos, mientras caminaban por el corredor desierto hacia la salida.

UN SUEÑO AGITADO

Esa noche, Saúl se desveló pensando en que la masa variable con la velocidad objeto de la charla de la víspera con Quique, estaba asociada a una transformación de energía radiante en cinética, y **no** era una masa inercial propiamente dicha. También recordó que en tiempos de Lorentz se había comprobado la variación de la masa con la velocidad en electrones acelerados por grandes diferencias de potencial. Los electrones tienen masa esencialmente electromagnética, así que era lógico que variaran su masa con la velocidad. Pero,.. ¿se podría comprobar la variación de masa de partículas sin carga? Desgraciadamente todos los aceleradores conocidos ,(Van der Graaf, Ciclotrón, etc.) actuaban sobre partículas cargadas. Además los métodos para determinar su masa en movimiento aprovechaban efectos eléctricos, como ser la medida del radio de la circunferencia que la partícula cargada describe cuando atraviesa un campo magnético perpendicular a su velocidad.

Saúl tomó un vaso de leche para combatir el insomnio, y volvió a la cama. En sueños se le apareció un viejo profesor del secundario que le decía: ¡Presta atención Saúl!: No toda la masa es electromagnética. Si una partícula no tiene carga no genera campo magnético con la velocidad. ¿De qué masa estamos hablando en ese caso? De masa inercial, pues. No hay energía magnética por unidad de volumen pero hay energía cinética...El viejo profesor le seguía diciendo: ¡Debemos realizar experiencias con partículas materiales sin carga a altas velocidades, para ver si aumentan su masa! Si fuera así, seguramente una masa inercial en movimiento genera algo parecido a un campo magnético. ¡Hay que averiguar eso, Saúl, ahora ponte a trabajar en eso, ahora, ahora!
Es posible que Saúl, haciendo caso del sueño se halle ahora en algún laboratorio ideando el experimento junto con su inseparable amigo y colega Quique. Todavía no se sabe nada sobre el asunto.

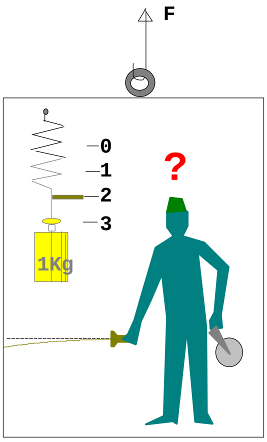
RELATIVIDAD PARTE II

En un sistema acelerado aparecen fuerzas de inercia sobre los cuerpos fijos a él. Esas fuerzas son proporcionales a la aceleración del sistema y a la masa de cada uno. Ya hablamos sobre el tema a propósito de Newton y Mach.

A Einstein el asunto también le preocupaba, y mucho. El hecho de que un campo gravitatorio funcionara como una aceleración lo animó a considerar formalmente gravedad y aceleración como una sola cosa, y postuló una equivalencia absoluta entre sistemas acelerados y sometidos a gravitación, avalada por el siguiente hecho:

No se puede discernir con ningún tipo de experiencias mecánicas ni electromagnéticas si estamos en un ascensor acelerado hacia arriba o sometidos a un campo gravitatorio hacia abajo: en ambos casos sobre nosotros actuará una fuerza que podremos suponer como peso o fuerza inercial indistintamente. Siempre que adoptemos escalas experimentales pequeñas, esto es no astronómicas, ni siquiera geográficas, cualquier experiencia mecánica que hagamos no puede detectar diferencias desde adentro del ascensor. De hecho se simulan para entrenamiento de astronautas campos gravitatorios nulos metiéndolos en un avión que describe una parábola de tiro. ¿Se podrán realizar experiencias **ópticas** que descubran si estamos en un ascensor o en caída libre en vez de en un campo gravitatorio? Einstein aventuró que no.

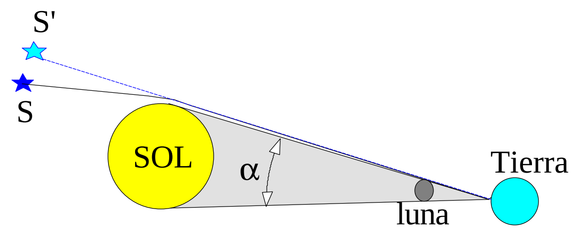
EN EL ASCENSOR DE EINSTEIN



Supongamos que nos suben dormidos a un ascensor sin vista al exterior con una pesa de 1 Kg. El ascensor parte con nosotros con una aceleración hacia arriba 1.g = 10 m/s^2 .
Nos despertamos y vemos que la pesa cuelga de un dinamómetro que marcará por supuesto el doble, o sea 2 Kg. Si la soltamos, caerá con una aceleración de 2g. ¿Con que tipo de experiencias podremos saber que si estamos en una cámara acelerada hacia arriba o bajo un campo gravitatorio doble al de la tierra? No parece posible con experiencias mecánicas, por lo visto.
Pero quizás si con experiencias electromagnéticas: Entonces, en nuestro bien equipado ascensor laboratorio, determinamos la trayectoria de un rayo de luz que parte perpendicularmente a la aceleración desde una de las paredes. Si estamos bajo una aceleración, el rayo aparecerá curvado en una parábola hacia abajo (como el tiro horizontal de un proyectil), puesto que cada elemento del rayo sale horizontalmente en trayectoria recta y alcanza a la pared opuesta más abajo Para el ascensorista el rayo describía una parábola. La equivalencia de Einstein exigía pues que la luz se curvara también con la gravedad.

Curvatura de la luz con la gravedad

Que la luz se curva con la gravedad es previsble aún sin considerar el principio de equivalencia de Einstein recién mencionado, sino por que la luz y la radiación electromagnética en general poseen como vimos una masa asociada. Masa inercial o gravitatoria, no hay diferencia entre ambas, deben ser afectadas por otras masas.

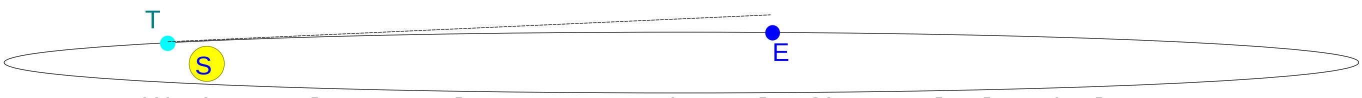


Durante el eclipse de sol una estrella que está detrás de éste en la posición S se puede ver debido a la trayectoria curva del rayo, que creea una imagen virtual en S'

A instancias de Einstein se realizó una experiencia famosa durante un eclipse total de sol en 1919 observable desde África, que demostró que la luz curva su trayectoria bajo los efectos de la gravedad, como si se tratara de un chorro de partículas materiales.
La base del experimento se basa en que, por esos regalos que nos hace Dios, la luna se ve desde la tierra bajo un ángulo α prácticamente igual que el sol. Los astrónomos dicen que los dos astros tienen el mismo tamaño aparente α. Este hecho permite observar durante los eclipses totales de sol una zona alrededor de éste (corona solar) sin el deslumbramiento habitual que produce el disco solar descubierto. Así durante los eclipses totales de sol pueden verse algunas estrellas junto a su borde. Algunas muy próximas en realidad están detrás del astro pero igual se ven. ¿Cómo es esto? En efecto, los rayos de luz provenientes de las mismas pasan rasantes a la superficie del sol donde reina una gravedad intensa y se curvan, pareciendo al observador que provienen de un punto exterior al disco solar, oculto momentáneamente por la luna durante el eclipse. Cuando el sol pasa, esas estrellas vuelven rápidamente a sus coordenadas celestes habituales.

El joven estudiante A.A.

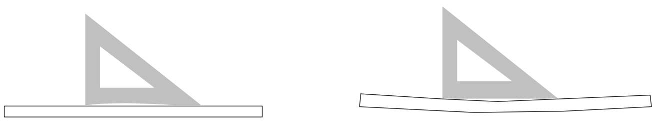
Cuando el joven A.A. vio el dibujo anterior, preguntó intrigado:
- ¿Qué tipo de curva es la que describe la luz bajo los efectos de la gravedad? Por lo visto es una curva abierta, no una elipse.
- Y por qué “creía” Vd. que debía ser una elipse?
- Yo “creía” que si la luz se curva en parábola bajo los efectos de un campo gravitatorio paralelo, debe curvarse en elipse bajo un campo radial como el creado por un astro.
- No necesariamente la trayectoria de un cuerpo bajo potencial gravitatorio es una elipse. Si su energía cinética es superior al potencial gravitatorio, escapa a los efectos de la gravedad y describe una trayectoria abierta, esto es una hipérbola.
- Pero entonces, ese dibujo de Newton subido a la montaña que disparaba un cañón....
- Si Newton carga bien el cañón y la bala de masa m sale con energía cinética superior a la potencial en el punto de disparo, ella no vuelve. ¿Se anima a plantear las ecuaciones correspondientes?
- Trataré, profesor - dijo A.A. , un poco arrepentido de haber hecho la pregunta.
Y a continuación escribió:
Energía cinética de la bala $Ec=1/2\ m\ .v^2$
Energía potencial de la bala a la altura r (medida desde el centro de la tierra, de masa M) $Ep=G.M.m/r$. Igualando ambas es $v_e=(2.G.M/r)^{1/2}$
- Muy bien, A.A. - dije, agregando el subíndice e a la velocidad - Le agrego el subíndice e de “escape”. v_e es la velocidad que necesita la bala (o cualquier cuerpo independiente de su masa) para escapar a la gravedad a la distancia r de otro cuerpo de masa M
- Que es el caso de la luz. Supongo que ella siempre supera la velocidad de escape de cualquier masa.
- Supone mal, joven. No hay en teoría inconveniente para que haya una masa suficiente como para atrapar a la luz en su gravedad. Imaginemos que nuestro sol lo hiciera.



Entre AA y yo dibujamos algo como lo representado en la figura: la luz de la estrella E llega a la tierra T describiendo una elipse muy cerrada, con el sol S en uno de sus focos.

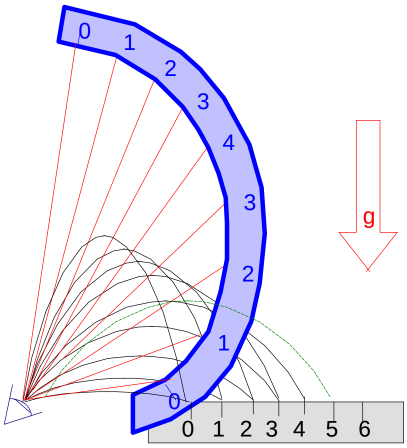
- Pero entonces... si la luz describe un movimiento planetario hallo el siguiente inconveniente: sabemos que la luz posee velocidad constante c, y ésto no es compatible con un movimiento planetario elíptico, en el que lo que es constante es la velocidad areolar, no la tangencial. Si la luz sale de E con velocidad c , ésta debería aumentar al acercarse al foco donde está S . ¿Cómo puede ser?.
- También se mantiene la velocidad areolar cuando la trayectoria es abierta, porque la fuerza (y la aceleración) pasan por el sol y no hay componente normal al radiovector. Este tipo de movimiento se llama "movimiento central". Así que el problema que Vd. plantea, de que ***la velocidad de la luz en trayectoria curva no puede ser constante*** subsiste.
- ¿Estará mal la ley de gravitación, entonces? - me preguntó el joven A.A.
- Investigue, muchacho. Y por favor avíseme lo que descubre.
Confío en que alguno de estos días el ya no tan joven A.A. me traiga novedades.

Una escuadra defectuosa y los agujeros negros. Pablo, un dibujante nuevito, trabaja sobre un plano de la ciudad de Nogoyá. Traza una línea con ayuda de la una escuadra y ve que el tramo de la cloaca máxima ha quedado ligeramente curvo, apartándose del medio de la calzada. Sospecha de la rectitud de la regla y trata de verificarla. ¿Cómo hace?: La apoya de canto sobre su mesa de dibujo y observa que queda un espacio en el medio. Pide ayuda a su jefe.
- Ingeniero, ¿dónde puedo conseguir otra escuadra, que ésta está torcida?



El ingeniero F.R., un poco deprimido por revisar facturas impagas, decide divertirse un poco. Le pide la escuadra, la mira y sentencia:
- Querido Pablo, la escuadra está derecha, la que está torcida es su mesa de dibujo: se ha curvado por apoyarse Vd. en ella. Lo noto un poco gordo, sabe?.
El pobre Pablo vacila, sabe que tiene un poco de panza y sufre. Luego se rehace, toma la escuadra y la mira de costado: los puntos de su borde, que deberían estar en una misma visual, están desalineados. Vuelve a la carga:
- ¿Le parece?, mírela entonces así, de costado. ¿Ve, que está torcida?.
A F.R. se le ocurre seguir con el juego:
- Ah, ahora está haciendo una comprobación óptica. Eso está mejor, sin embargo no es definitiva. El otro día escuché cuando Vd. le explicaba a la rubia arquitecta T que la luz puede tomar caminos curvos.
- Ah!, la arquitecta T....Si, a ella le gustan esos temas. El de la curvatura de la luz es uno de mis favoritos, pero ...
El muchacho se da cuenta que le están tomando un poco el pelo, pero sin maldad. Así que sonríe cuando el ingeniero abre un cajón y le alcanza una escuadra nueva.
- Gracias, y a propósito ¿le gustan los temas de "física marginal", ingeniero?
- ¿Y eso qué es? ¿Tienen que ver con las arquitectas blondas? pregunta F.R.
- No, por favor, es asunto puramente científico. Yo llamo física marginal a la que se aplica en casos límites: gravedades enormes, grandes presiones, temperaturas muy bajas o muy altas. En general, situaciones poco frecuentes en nuestro mundo pero posibles y aún comunes en el resto del universo.
- ¡Qué interesante! A ver, cuénteme, muchacho!
Pablo da una explicación excelente, con dibujos y todo:

- Supongamos que la luz se curvara notablemente bajo algún efecto, por ejemplo la gravedad. Los rayos salidos de un borde recto serían parábolas, como las trayectorias de proyectiles provenientes de cada punto luminoso del objeto. El observador vería las imágenes de esos puntos en la prolongación de los rayos que llegan al ojo sobre una curva: la regla, en realidad perfectamente recta aparecería curvada a la vista. Y no sólo eso!... También se daría el caso que puntos muy alejados del objeto no podrían verse: por ejemplo en la figura el observador no puede ver más allá del número 4 en la escala. Ningún rayo proveniente del 5 es capaz de llegar al ojo en su movimiento parabólico (línea punteada).
- ¡Fantástico, tiene razón! - dice entusiasmado F.R. - ¿Y se dan en el universo esas condiciones de gravedad tan intensa?



- Dicen los astrónomos que en una etapa de su evolución las estrellas se enfrían y colapsan bajo su propia gravedad, alcanzando enormes densidades. Si su masa inicial es suficiente crean un campo gravitatorio tan intenso que impide a la luz salir de él.

- Es decir que la velocidad de escape en ese sistema supera la de la luz: he leído que ello ocurre si un cuerpo esférico se contrae hasta un determinado radio, (se llama radio de Schwarzschild, o algo así) - dijo F.R.

- En efecto, ingeniero, en honor a Karl Schwarzschild quién estudió la cuestión en 1916.

- Hagamos unos cálculos - dijo el ingeniero - El radio de Schwarzschild $\mathbf{r}_s$ para el cuerpo de masa **M** supuesto esférico y homogéneo es tal que la velocidad de escape es igual a la de la luz y por lo tanto nada puede sustraerse a caer sobre él, ya que nada puede ser lanzado a velocidad superior a c. En ese caso planteamos $m.c^2/2=G.M.m/r_s$

- Resulta así que $r_s = 2.G.M/c^2 = 2 \times 7{,}4 \times 10^{-28}$ M . Por ejemplo en el caso del sol es $M=2x10^{30}$ Kg , con lo cual el radio de Schwarzschild para nuestro sol vale solo 1480 m ¿Qué pasaría, Pablo, si el sol se contrajera hasta este radio?

- Por de pronto no arrojaría luz sobre nosotros. El cuerpo de radio igual o menor al de Schwarzschild se ve negro desde afuera, al chuparse la luz que incide sobre él. En realidad se chupa la luz y todo lo que está a su alcance.

- Tengo entendido que hay varios de estos agujeros negros en el universo - comenta F.R.

- Así dicen los astrónomos - contesta Pablo - Inclusive parece que hay uno cerca, en nuestra galaxia.

- En él debe haber caído esa carpeta que ando buscando hace dos días!..

-o-o-o-

TERMODINÁMICA

Todavía oigo la sonora voz del querido profesor Staricco en esa aula de Paseo Colón allá por el año 1958: “Así como conviene que todos se lleven bien con el comisario o el juez, todas las ciencias deben llevarse bien con esa matrona de las ciencias, que es la Termodinámica”.

Cuando un modelo falla, cuando alguna teoría hace agua, conviene preguntarse si no está contradiciendo algún principio termodinámico, si no está desagradando al comisario.

La Termodinámica nació a principios del siglo XIX de preocupaciones pedestres como una técnica para mejorar el “aprovechamiento del poder del fuego”. Pero el fuego tiene algo mágico, porque su estudio abrió las puertas a un nuevo tipo de conocimiento.

Calor y trabajo - Primer principio de la Termodinámica

El calor es una forma de energía diferente a otros tipos conocidos, como la mecánica (cinética o potencial) o la química. Es también diferente a la energía interna, la que guardan en su interior los cuerpos en su movimiento molecular. La energía interna tiene pues una causa microscópica y una manifestación externa macroscópica: la temperatura o nivel térmico del cuerpo que la posee.

La termodinámica separa estos tres tipos de energía: la mecánica, el calor y la energía interna, a través de lo que se conoce como “el primer principio”, que no es otra cosa que el de conservación de la energía:

ENERGÍA TRANSFERIDA EN FORMA DE CALOR AL SISTEMA = TRABAJO EJECUTADO POR EL SISTEMA + VARIACIÓN DE ENERGÍA INTERNA DEL SISTEMA

Traducido a fórmulas esto es: $dQ=dL+dU$

James Prescott Joule (1818-89), famoso físico inglés, estudió la transformación de energía mecánica en calor. Un peso elevado trasformaba su energía potencial en calor al mover en su caída a un molinete dentro del agua de un calorímetro. Ésta subía su temperatura.

Demostró con tal experiencia que un trabajo mecánico de aproximadamente 4 Joules hacía ascender un grado centígrado la temperatura un gramo de agua. El equivalente calórico del trabajo es así de 0,24 cal/Joule.

La experiencia nos muestra que diferentes tipos de energía tienden a transformarse en calor, a través de procesos más o menos espontáneos.

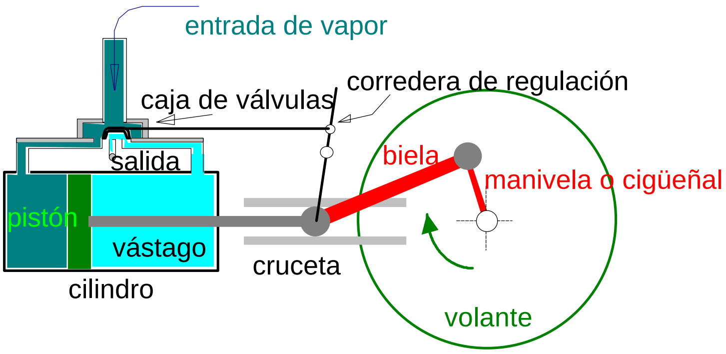
En cambio la transformación inversa de calor en trabajo no puede realizarse completamente aún con los mejores ingenios, y su eficiencia, siempre menor a 0,24 cal/joule, depende sobre todo del salto térmico, o sea la diferencia de temperatura entre la fuente y el sumidero de calor a los que se conecta el motor térmico.

Por todo ello se dice que el calor es una forma de energía degradada, o que la energía tiende a degradarse en calor, porque en esa forma sólo puede recuperarse parcialmente.

Un poco de historia:

En 1824, el ingeniero militar francés Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832) recibió el encargo de su gobierno de realizar un estudio para optimizar la máquina de vapor, un ingenio inventado hacía casi medio siglo antes por los mecánicos ingleses Thomas Savery (1650?-1715) y Thomas Newcomen y luego perfeccionada por el escocés James Watt(1736-1819).

La máquina de vapor transformó la industria del mundo. Impulsó barcos y movió máquinas de todo tipo, reemplazando a las velas, molinos, bueyes, caballos y...a la mano de obra humana. Inició pues la revolución industrial con sus inconvenientes y ventajas. Pero sobre este tema todos sabemos bastante. En cambio son otros los aspectos que nos interesan ahora:

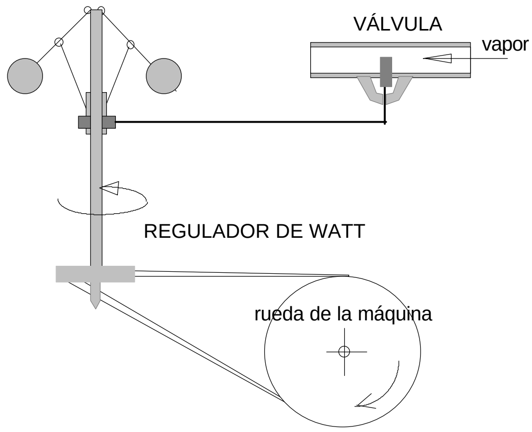


ESQUEMA DE UNA MÁQUINA DE VAPOR DE DOBLE EFECTO

Un poco de ingeniería:

Descripción y principio de funcionamiento de una máquina de vapor alternativa.

La primitiva máquina de vapor alternativa consta de un cilindro en el que se desliza un émbolo o pistón desde uno a otro extremo. El pistón, en su movimiento alternativo acciona una rueda o volante mediante un mecanismo biela-manivela. El cilindro comunica con la parte superior de un recipiente con agua cerrado que se calienta con fuego: es la “caldera” que produce vapor de agua caliente, el agente motriz. Cuando el pistón está el principio del cilindro, el vapor entra por ese extremo a través de la válvula de admisión y desplaza al pistón hacia el otro extremo. Antes de llegar a él se cierra la válvula de admisión y se aprovecha la expansión del vapor que entró hasta ese momento. La expansión continúa hasta que el pistón llega al fin del cilindro. Impulsado por la inercia del volante el pistón vuelve en sentido contrario y barre a través de la válvula de escape al vapor “usado”, el que escapa al aire o mejor va a un condensador. El ciclo recomienza cuando el pistón vuelve a encontrarse en el extremo primero, cerrándose la válvula de escape y abriéndose la de admisión. La apertura y cierre cíclico de las válvulas o lumbreras (orificios de entrada o salida de vapor) están comandadas por un mecanismo de biela manivela secundario desfasable a voluntad con respecto al principal. En las máquinas de doble efecto, el vapor entra alternativamente por uno y otro extremos del cilindro, mejorando así su uniformidad de marcha.



Desde sus comienzos la máquina de vapor fue objeto de continuos perfeccionamientos en los materiales, forma, diseño y acabado de sus órganos (pistón, cilindro, biela, cojinetes, doble efecto, avance de admisión y del escape, etc.), mejoras en el ciclo térmico (agregado del condensador, aumento de la temperatura y calidad del vapor, etc.) y mejoras en los generadores de vapor o calderas y accesorios (bombas, controles, etc.). Los trabajos de James Watt en tal sentido fueron tan importantes que a veces se lo toma como su verdadero inventor.

De Watt es el célebre regulador centrífugo que aún se usa en las turbinas para mantener la velocidad de giro independiente de la carga mecánica de la máquina. Cuando ésta disminuye la máquina tiende a acelerarse, las bolas del regulador suben y a través de un sistema de barras tienden a cerrar la válvula de entrada del vapor. El fenómeno inverso ocurre cuando la máquina tiende a “quedarse”.

Volver a vivir

Hasta mediados de este siglo se usaban comúnmente máquinas de vapor alternativas en locomotoras de ferrocarril, barcos, grúas y bombas de agua. Los perfeccionamientos del motor Diesel de las turbinas de vapor y de gas fueron desplazando a la máquina alternativa, más rústica y confiable pero más pesada y menos rendidora. Actualmente es muy raro ver alguna máquina de vapor en funcionamiento efectivo salvo algunas locomotoras en ferrocarriles turísticos, museos y otras curiosidades. Los que tenemos algunos años recordamos las impresionantes “máquinas” de los trenes de nuestra niñez, que habían llegado a un grado de perfección y confiabilidad que hoy quisiéramos para nuestros inexistentes ferrocarriles.

Más historia:

En la época de Carnot y a pesar de los progresos introducidos por Watt, las máquinas de vapor tenían dos defectos principales: eran imperfectas mecánicamente y aprovechaban poco el calor del combustible (leña, carbón). Lo primero tendió a mejorar con máquinas-herramienta para tornear los cilindros y pistones más elaboradas, obra de mecánicos y artesanos. El mejor aprovechamiento del calor surgió de los estudios que se le encomendaron a Carnot, como se dijo antes. Fueron llevados a cabo tan magistralmente que trascendieron el área técnica, la termología y la física misma. Llegaron a tocar los límites del conocimiento humano y lo conmovieron profundamente. La técnica abrió las puertas a la metafísica y detrás de la Termodinámica apareció la refulgente firma del Creador. Ahora veremos cómo.

Desde la época de Carnot no se ha avanzado substancialmente en el estudio teórico sobre la transformación de calor en trabajo. Un profesor de física de nuestra época, el inolvidable Ingeniero Cattáneo, lo expresaba muy gráficamente: decía que Carnot le puso la tapa al tema del calor, tan perfecta y acabada fue su obra.

Las ideas de Carnot:

La génesis del pensamiento Carnotiano es la analogía entre el calor y la hidráulica. Para Carnot el calor era un fluido que tenía un nivel dentro de los cuerpos que ocupaba. Este nivel es la temperatura de esos cuerpos. Como buen fluido, tendía a pasar al sitio de nivel más bajo y era remiso a subir pendientes, a menos que se lo empujara de alguna forma. Como el agua, podía producir energía mecánica al saltar de un nivel a otro más bajo, y era necesario trabajo exterior para hacerlo subir “bombeándolo” desde lo frío a lo caliente.

La primera conclusión a la que lo llevó esta analogía era que no podía transformarse calor en trabajo si no existían dos fuentes a diferentes temperaturas. Un mar caliente no podía entregar energía aprovechable al motor de un barco que no pudiera ceder calor a otro mar más frío. Una caldera que alimentaba una máquina de vapor no servía si ésta no tenía escape a la atmósfera fresca o mejor al condensador refrigerado.

Luego, a punta de puro razonamiento, Carnot ideó una máquina ideal irrealizable aún en nuestros días, pero posible como límite de la técnica: la máquina térmica reversible es motor o refrigerador según se extraiga o se entregue trabajo mecánico en su eje.

Con conceptos que usaban el límite físico de manera parecida al límite matemático en el “cálculus”, Carnot imaginó un ingenio reversible que demostró poseería el rendimiento máximo posible. Es decir que ninguna otra máquina podría transformar mayor cantidad de calor en trabajo que la suya; a lo sumo igual, nunca mayor.

La máquina de Carnot constaba de un cilindro con el consabido mecanismo de biela-manivela-volante. Dentro del cilindro había un gas (aire, por ejemplo) que cumplía un ciclo de calentamiento y enfriamiento: funcionando como motor se le suministraba calor desde afuera del cilindro con una fuente de fluido caliente durante el calentamiento y se enfriaba con un líquido refrigerante luego. Al calentamiento y enfriamiento el gas dentro del cilindro correspondía con las consabidas variaciones de volumen, como nos enseñan las leyes de los gases. El trabajo calculado entregado al volante en la expansión era mayor que el recibido del volante en la compresión. Era muy parecido a un motor térmico común, con la diferencia de que las evoluciones de los fluidos eran térmicamente reversibles. Si desde afuera se movía su eje, Carnot pretendía que las evoluciones ocurrían en sentido contrario, resultando un flujo de calor inverso, o “bombeo” de calor, desde la fuente fría a la caliente. Era pues un refrigerador.

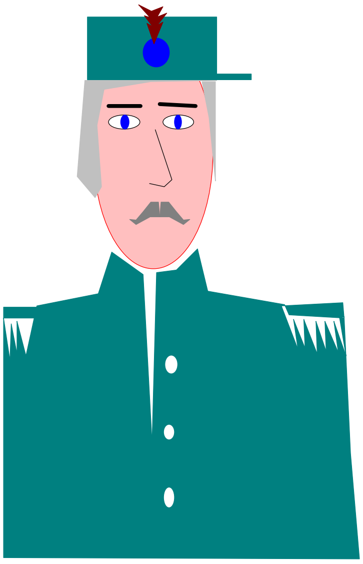
La reversibilidad física:

Para entender lo que los físicos quieren decir con “evolución reversible” recordemos que todo sistema tiende naturalmente a evolucionar hacia un estado de equilibrio. En él cesan los cambios, sean movimientos de conjunto, movimientos internos como transformaciones de estado, transferencias de masa, energía y calor. El estado de equilibrio puede considerarse macroscópicamente como quietud derivada de tendencias igualadas. Estas tendencias de cambio (driving forces, en inglés) se cuantifican como funciones generalmente fluxionales. El ejemplo típico de ellas es la tendencia al paso o “transmisión” del calor, en el que la “driving force” es el gradiente de temperatura o sea la pendiente por la que fluye el calor desde lo caliente a lo frío. En su evolución hacia el equilibrio interno de sus partes o zonas, por el sistema fluye calor con intensidad proporcional a esas desigualdades de temperatura. Como resultado de la evolución se van suavizando los gradientes y así también la intensidad del pasaje de calor hasta que en un tiempo muy largo se alcanza prácticamente el estado de equilibrio, en el que el sistema tiene temperatura pareja.

Cualquier evolución en la práctica ocurre debido a un gradiente y por lo tanto tiene definido su sentido: la piedra cae hacia abajo, el calor fluye hacia lo frío. Los físicos termólogos de la época de Carnot tenían un problema: para definir un sistema en evolución térmica, o sea un sistema fuera del equilibrio térmico, no poseían leyes: en efecto, las leyes de estado de los cuerpos (sólidos, líquidos y gaseosos) se determinaban con sistemas de masas de esos cuerpos en condiciones de equilibrio. Las ley de los gases, $p.v=n.R.T$ era válida para un volumen de n moles homogéneo y todo a la misma presión p, todo al mismo volumen v y a la misma temperatura absoluta T. Pero en el cilindro de una máquina el vapor el gas estaba más comprimido cerca de la válvula de admisión que sobre el pistón. Ni que hablar que adentro de esa masa había remolinos y ondas de choque por todos lados. Sobre las paredes más frías el vapor empezaba a condensarse: había líquido y vapor. En fin, no era lo que se dice un sistema en equilibrio.

Los físicos sabían que ese desorden importaba una pérdida de eficiencia pero no sabían como cuantificarla: Había que encontrar la forma de medir el desorden. Pero desorden e irreversibilidad eran casi sinónimos en termología. Así que imaginaron la reversibilidad como desideratum, a la que había de tender toda evolución dentro de una buena máquina.

Un reportaje caliente (termodinámicamente hablando)



¿Cómo es una evolución reversible? Preguntémosle al Capitán Carnot en persona.

- Sr. Carnot, ¿como es que Vd. dice que en su máquina las evoluciones que sufren los fluidos son reversibles?

- Lo que imagino es una evolución ideal a la que me puedo acercar todo lo que quiera: **es una sucesión de estados de equilibrio**, ya que así no hay pérdidas de energía. Es irreversible porque cambiando un poquitín la "driving force" (casi nula) invierto el sentido de la evolución

- A ver si entendimos bien: Una transmisión de calor reversible entre el fluido exterior y el interior del cilindro de su máquina se llevaría a cabo con una diferencia de temperatura minúscula entre ambos y un tiempo muy grande.

- Correcto, señores. En teoría una evolución reversible debe realizarse a gradiente cero y por lo tanto a tiempo infinito. Por supuesto que la diferencia entre el exterior y el interior del cilindro puede ser en la práctica de algunos grados, de manera de no provocar grandes desequilibrios en los gases, pero lo suficiente para que el proceso no sea extremadamente lento. Ello nos obligaría a construir una máquina muy grande para obtener muy poca potencia en el eje.

- Le agradecemos su aclaración, Capitán, y aprovechamos su gentileza para pedirle que nos explique por qué su máquina es la que posee el mayor rendimiento.

- Con gusto, señores. Haré una demostración "por el absurdo". Admitamos que haya una máquina también reversible que posea mayor rendimiento que la mía: la conectamos al eje de mi máquina, de manera que reciba todo el trabajo mecánico de la mía en su eje.

- Es decir que trabaje como refrigerador.

- Exacto. Y supongamos que como tal bombee calor desde y hacia las mismas fuentes fría y caliente respectivamente que las que utiliza mi máquina.

- Ah!... Ya veo. Si tiene mayor rendimiento bombeará más calor del que "baja" a través de su máquina. Si las fuentes no tienen otro aporte o drenaje de energía que las de las dos máquinas ocurrirá que la fuente caliente se calentará y la fría se enfriará. ¿Y entonces..?

A Monsieur Carnot le relampaguean los ojos de excitación y dice impaciente:

- ¡Y entonces, y entonces! Et alors, messieurs!...¿Les parece verosímil esta situación?

- Francamente no terminamos de ver el inconveniente - decimos nosotros a coro.

Al oír esto Carnot sufre un sofocón de cólera científica: ¡Es que se está dudando del **Segundo principio de la Termodinámica.** El soldado suelta palabras en dialecto normando que no entendemos. Luego, más sereno nos advierte:

- Pero señores!.. ¿No ven Vds. que si así fuera se bombearía calor desde la fuente fría a la caliente sin gasto de energía mecánica?. Hasta Lord Kelvin lo sabe. Recuerden que eso nunca puede pasar.. Por lo menos nunca nadie vio que algún proceso natural o artificial condujera a algo semejante.

Balbuceamos una disculpa y nos alejamos avergonzados, dejando a Carnot incrédulo de que en el siglo XX haya tanto ignorante suelto.

Uno del grupo se lamenta de no haber podido hacerle a Carnot la siguiente pregunta:

- ¿Que ventaja tiene su máquina frente a otra que tenga un ciclo diferente aunque también reversible? Ambas tienen rendimiento máximo.

Carnot le hubiera explicado:

- Con mi ciclo de cuatro transformaciones, dos isotérmicas a temperaturas $T_1 > T_2$ respectivamente y dos adiabáticas, se deduce fácilmente que el rendimiento tiene la siguiente expresión:

$$h = 1 - T_2/T_1$$

O sea que solamente es función de las temperaturas de las fuentes.

Clausius y la Entropía

La expresión matemática del rendimiento máximo de la máquina térmica perfecta de Carnot frente a otras y el estudio de la evolución de su ciclo permitió definir una función matemática que tenía que ver con el grado de reversibilidad de una evolución. Se la llamó "**entropía**".

Esta palabra, cuya etimología es oscura, fue empleada por primera vez por el físico polaco Rudolf Julius Emanuel Clausius (1822-88). Éste definió a la entropía S a través de su variación o diferencial dS **en una evolución reversible**, de manera que:

$dS = dQ/T$ (válido solamente para una evolución reversible)

expresión que se lee "la variación diferencial de la función entropía dS para una diferencial de cantidad de calor transferida en forma reversible dQ es el cociente entre ésta y la temperatura absoluta T a la que se realiza dicha transferencia"

Al igual que el potencial eléctrico o gravitatorio y al contrario del trabajo o la cantidad de calor, que no son funciones potenciales sino que dependen del camino por el que ha transcurrido el cambio del sistema, la entropía es una función potencial. Quiere decir esto que en una evolución entre dos estados (1 inicial y 2 final) de un sistema, la variación de entropía es la diferencia entre los valores inicial y final, no importando los estados intermedios. Se expresa matemáticamente lo anterior calculando la suma de infinitos términos diferenciales o "integral" (que se simboliza $\int dS$) realizada a lo largo de dicho camino. Resulta pues así que ${}_1\int^2 dS = S_2 - S_1$

Así también en un ciclo cerrado la variación de entropía es nula ya que es la diferencia entre dos valores iguales correspondientes al punto de arranque del ciclo, que es también el de su terminación.

Ahora bien, si calculamos dQ/T en una evolución no reversible, la teoría del rendimiento de la máquina de Carnot nos revela que su valor es menor al correspondiente de dS , resultando que $\int_o dQ/T < 0$ en un ciclo cerrado que tenga al menos una parte de él irreversible.

En un Colegio Salesiano

Estos juegos físicos y matemáticos derivados del pensamiento de Carnot y Clausius pueden aburrir a más de uno y lo comprendo. Hasta parecen algo obvios, y además intranscendentes.

Sin embargo para algunos no es así. Escuchemos una conversación entre el joven Padre Bruno y su colega más viejo, el Padre Hernán. La acción en un Colegio de la Obra de San Juan Bosco, El Cardenal Cagliero, a 20 Km de San Carlos de Bariloche.

Es verano, tiempo de clases. Los alumnos aprenden en las aulas. Los dos curas toman sol en el patio mientras discuten:

- Estuve leyendo en el texto clásico de Termodinámica del profesor Estrada una relación entre el segundo principio y la existencia de Dios - dice Bruno.

- No me sorprende que el caballero Alejandro de Estrada haya encontrado la firma de Dios en la ciencia, como buen creyente que es... - contesta Hernán, y prosigue:

- Personalmente no entiendo cómo hay gente que ve una puesta de sol, una flor, una naranja o el hongo de la penicilina y no advierte que Dios los puso a nuestro servicio. ¿Se acuerda, Bruno, de la “Isla Misteriosa”, de Julio Verne?

El Padre Hernán gustaba de este tema y lo tocaba siempre que podía. No llevaba cuentas si ya se lo había contado alguna vez a su interlocutor de turno. Bruno lo sabía y fué condescendiente.

- La continuación de “Veinte mil leguas de viaje submarino”? - preguntó inocentemente, como si no supiera lo que va a venir.

- Exacto. Bueno, recordará que llegan a una isla unos náufragos y empiezan a notar que ocurren cosas a su favor. Un día dejan un bote mal amarrado y al día siguiente la soga tiene dos nudos. Otro día olvidan un fuego peligroso encendido y luego lo encuentran apagado, bien regado. Al final no dudan de que “alguien” se preocupa por ellos. Nosotros en cambio, con muestras mucho más evidentes y maravillosas somos remisos a aceptar que “Alguien” nos ha preparado este maravilloso mundo, nos ama y se preocupa por lo mínimos detalles.

- Si, Padre Hernán, estoy de acuerdo que deberíamos darnos cuenta de que Dios es nuestro “Capitán Nemo”. Pero....

El Padre Bruno agrega con cierta malicia:

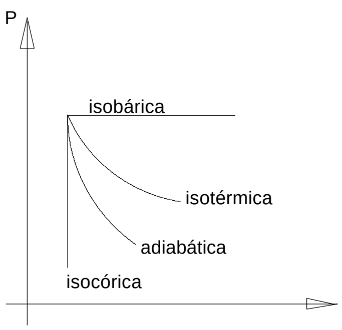
- Pero a veces es difícil comprender por qué Dios nos manda una tormenta mientras estamos en nuestro bote de pesca. ¡Mire lo que le pasó al Padre Gustavo en el Nahuel Huapi!...

- Ya le dije muchas veces que Gustavo era un santo y ese accidente lo llevó más rápido al Cielo. Prueba de que Dios lo amaba y lo quería a su lado. - Hernán se interrumpió y luego en tono más tranquilo siguió:

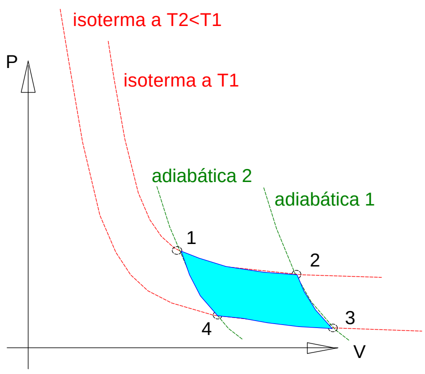
- Bueno, pero nos estamos yendo del tema que Vd. trajo. Cuénteme por favor lo del libro de Estrada.

- Bien: ¿Recuerda Vd. que nos enseñaron en los cursos de Termodinámica que la integral $\oint$ **dQ/T < 0** en un ciclo cerrado que tenga al menos una parte de él irreversible?.

- Me acuerdo y se lo explico en un diagrama PV.

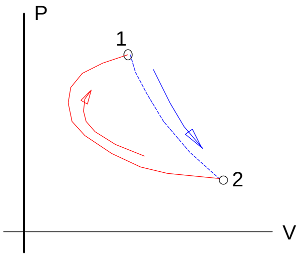


EVOLUCIONES GASEOSAS TÍPICAS



CICLO DE LA MÁQUINA DE CARNOT

Hernán sacó un papel del bolsillo e hizo un dibujo como el de la figura, a tiempo que explicaba, ensayando dar clase, que el diagrama PV o de “presión - volumen” era un gráfico muy usado para representar evoluciones de masas gaseosas en equilibrio. Había varios tipos de evoluciones: a volumen constante (línea vertical), a presión constante (horizontal), a temperatura constante o isotérmica (hipérbola), sin intercambio de calor o adiabática (curva de mayor pendiente que la hipérbola). De paso dibujó un ciclo de Carnot en el plano PV porque sabía que alguno de nosotros nunca lo había visto. (Sabía que este libro se imprimiría algún día con esta historia)



Cuando Hernán terminó, el Padre Bruno sonrió satisfecho:

- Está bien eso de poner en línea punteada la parte irreversible de 1 a 2 ya que no es una sucesión de estados de equilibrio y no hay puntos representativos en el diagrama. Por el mismo motivo, para la vuelta reversible de 2 a 1 trazó Vd. línea llena. Dígame, amigo Hernán, ¿qué pasaría si la parte irreversible fuera adiabática?

- Pues que no habría intercambio de calor en ese tramo, siendo siempre **dQ=0** y también $\int_1^2 dQ/T = 0$.

Como sé que me lo va a preguntar, joven amigo, le anticipo que la vuelta de 2 a 1 por no ser adiabática y sí ser reversible, cumple con la siguiente expresión:

$$\int_2^1 dQ/T = S_1 - S_2$$

Entonces, en base a todas las expresiones anteriores podemos poner:

$$\oint dQ/T = \int_1^2 dQ/T + \int_2^1 dQ/T = S_1 - S_2 < 0$$

De aquí se deduce que $S_2 > S_1$, o sea que la entropía del sistema aumenta cuando éste evoluciona con una adiabática irreversible. ¿Vio cómo me acuerdo?

- ¡Me deja con la boca abierta! - exclamó Bruno

- Se caerá de espaldas cuando le diga lo que se me acaba de ocurrir - prosiguió Hernán - Una evolución adiabática irreversible es lo normal en un sistema cerrado, donde el calor no puede entrar ni salir. Nuestro universo puede considerarse un sistema cerrado, así que la entropía del universo va constantemente en aumento, a medida que ocurren fenómenos naturales (irreversibles).

- No me va a decir, Padre Hernán, que eso se le ocurrió recién.

- En realidad tengo un ejemplar de la Termodinámica de Estrada, y a veces la hojeo un poco....

- ¡Ya me parecía! - dijo Bruno decepcionado.

- Y bueno,.. hay que repasar los temas de clase cada tanto - admitió Hernán.

- Entonces sabrá cómo termina el asunto, ¿no?

- Seguro - afirmó Hernán - Llegamos a la conclusión que si se producen cambios es porque la entropía sigue aumentando en nuestro mundo.

Su voz se ensombreció:

- Cuando no aumente más, estará el universo en mortal equilibrio final, todo quieto, a la misma temperatura. No habrá vida, que supone reacciones químicas y cambio. Todo quieto. Todo muerto....

Un silencio de algunos segundos siguió a esta lúgubre descripción de Hernán. El patio soleado, los árboles verdes, el cielo y las montañas distantes que brillaban al sol desmentían que alguna vez pudiera ocurrir algo semejante.

- También podemos deducir que si la entropía está en aumento ahora, en un momento fue S=0 , es decir en el momento de la creación la entropía era nula - dijo Bruno, con ánimo.

- Perfecto: por eso la entropía nos da la edad del universo y la seguridad que éste no existió desde siempre. Hubo un principio. - sentenció Hernán.

- ¿El Big Bang? - aventuró Bruno

- Así dicen. Llámelo como quiera. Para mí es el momento del “Hágase la luz”.

En ese momento el sol austral pareció brillar más intensamente sobre los dos hombres.

- ¡No creo que llegue ese final fúnebre que Vd. describió hace un rato! - dijo Bruno.

- ¡Confío en que Dios no lo permitirá!. Él puede convertir al Universo en un sistema abierto. Él puede hacerlo - terminó diciendo el Padre Hernán.

Sonó un timbre y el patio se llenó de chicos bulliciosos que venían al recreo.

-o-o-o-

TERMODINÁMICA MICROSCÓPICA

La Termodinámica clásica de Carnot y Clausius era esencialmente macroscópica: tomaba sistemas sin atender sus detalles íntimos. Sin embargo los físicos empezaron a necesitar ese detalle que ayuda a mejorar la comprensión del tema. Por ejemplo se admitía que la energía interna de un cuerpo dependía del movimiento microscópico molecular, pero no se sabía bien como estudiarlo.

Sin duda no era práctico abordar su estudio como suma o interacción de efectos individuales. Ya es complicado modelizar una mesa de billar con ocho bolas. Lo que será modelizar una damajuana de 1 mol de gas, o sea una mesa de billar tridimensional de $6x10^{23}$ bolas!

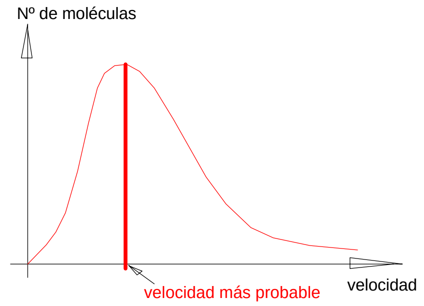
Si los políticos y estadistas pretenden pronosticar el comportamiento global de una nación de muchos millones de habitantes en base a sus hábitos medios, los físicos pensaron que sería más fácil estudiar estadísticamente a otras tantas moléculas mucho más disciplinadas que aquéllos.

Otra vez Maxwell

James Clerck Maxwell, el mismo genio que resumió la electricidad en cuatro ecuaciones famosas, abordó también el problema de los gases.

Produjo un modelo para la *creencia* admitida en la época, de que las moléculas, animadas con rápidos y caóticos movimientos con las leyes del choque elástico de Newton en función de la temperatura, intercambian energía entre sí y ejercen presión contra las paredes del recipiente. Era el modelo de la “teoría cinética de los gases”.

Según el modelo en el balón de gas en equilibrio global existe un caos a nivel microscópico en el que sin embargo impera la ley de probabilidades. Se trata de un equilibrio dinámico, en el que las leyes macroscópicas (por ejemplo pv=nRT) son sólo promedios de gran cantidad de casos individuales. Para una temperatura determinada de la masa de gas, el promedio de velocidades individuales tiene entonces un valor fijo. Pero a nivel individual una molécula intercambia energía en sus incesantes choques con otras y pasa así por toda una gama de velocidades.



DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES
DE LAS MOLÉCULAS DE UN GAS

Tiene sentido caracterizar el caos general con una estadística que diga como se distribuyen porcentualmente las moléculas según sus velocidades. Se tiene así una “función de distribución”.

Según el modelo de Maxwell hay una probabilidad muy escasa de existencia de moléculas muy rápidas o muy lentas. Se deduce que existe una velocidad que es la más probable, en la que rondarán un gran número de moléculas. Por ejemplo se calcula que entre cero y esa velocidad se encontrarán el 41% de todas las moléculas de la masa gaseosa considerada. En fin, tenemos una información en forma de “curva de distribución”, una función acampanada como la que se muestra en la figura.

Boltzmann

Ludwig Boltzmann, (1844-1906), físico austríaco, famoso por sus estudios sobre la radiación térmica de los cuerpos, también abordó el tema de los modelos gaseosos estadísticamente de manera parecida a Maxwell aunque en forma más general, no solo aplicable a moléculas sino a otras partículas que forman también conglomerados que pueden considerarse también “gases” (por ejemplo gases de electrones o de fotones).

Su modelo de gas era el de un bolillero de lotería con un clasificador con gran cantidad de casilleros. Cada casillero tenía asignado un intervalo de energía. Había una gran cantidad de maneras de colocar todas las bolillas en los casilleros, de la misma manera que en la Naturaleza las moléculas podrían adoptar individualmente cada una velocidad entre un valor cero y un valor prácticamente infinito.

El modelo de Boltzmann tiene la posibilidad de trabajar con partículas distinguibles o indistinguibles, excluyentes o no, de número total constante o variable, aunque siempre exactamente iguales.

Distinguibles como las moléculas de una gas, que en teoría podrían “marcarse” para seguir a cada una individualmente. O también partículas que perdieran la identidad después de interaccionar entre sí, mudando de identidad, por decirlo así.

Asimismo, el modelo permite trabajar con partículas que pueden ser o no excluyentes, es decir que puedan entrar sólo una o más de una en cada casillero. Un gas tiene moléculas no excluyentes, que podrían llegar a estar todas ellas en un sólo casillero, por ejemplo el de energía cero a temperatura cero. En cambio un gas de electrones, como el que existe dentro de un metal, no puede llegar a la misma condición aunque su temperatura sea cero, por esa característica especial de los electrones que Pauli llamó principio de exclusión.

También está permitido considerar gases en que se mantiene el número total de moléculas constante, o cuyo número varíe continuamente como en el caso de los fotones.

En el caso de un gas molecular común, que fue el que estudió Boltzmann con su modelo, éste se acomoda para hacer corresponder a cada molécula una bolilla con número fijo, considerando cada bolilla como un ente individualizable aunque equivalente a cualquier otra.

Boltzmann llamó “**complexión”** a cada uno de los arreglos que atendían a la cuestión de “**cuáles** bolillas están en cada casillero”. Definió como “**estado**” a la configuración atendiendo solamente “**cuántas** bolillas están en cada casillero”**.** Así entonces **un** estado de dos casilleros con dos bolillas en cada uno puede tener:

12/34 - 13/24 - 14/23 - 23/14 - 24/13 - 34/12 seis complexiones posibles.

La complexión no cambia cuando se permutan el orden de las bolillas en un mismo casillero. Así es la misma complexión 12/34 que 21/34 o 21/43 o 12/43.

Los que saben algo de matemática combinatoria y probabilidades, sacarán provecho y diversión tratando de encontrar una fórmula que de el número de complexiones y de estados para un sistema de m casilleros y n bolillas.

Se comprende que macroscópicamente un sistema de partículas iguales no varía si no cambia el estado representativo de la situación de sus moléculas. También es lógico que en el equilibrio el gas esté en el estado que ofrece más posibilidades de formarse.

Con estas premisas, Boltzmann calculó cual sería la probabilidad genérica de un estado, en base a la definición clásica de probabilidad: casos favorables (complexiones de un estado) divido casos posibles (todas las combinaciones posibles).

Encontró el máximo de esa función de probabilidad genérica con procedimientos matemáticos relativamente comunes (derivada igualada a cero) y obtuvo la función de distribución más probable. Las fórmulas coinciden con las de Maxwell.

Hoy se habla de la teoría cinética de los gases y de las fórmulas de Maxwell-Boltzmann, dándole lugar de honor a ambos en el estudio y descripción del modelo.

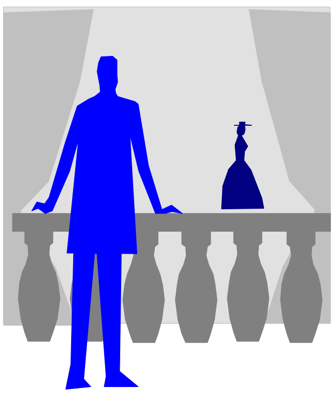
Podemos decir que las fórmulas estadísticas de Maxwell-Boltzmann dan la distribución de velocidades o energías de las moléculas de un gas, esto es qué fracción de las moléculas totales tienen una velocidad lineal (o una energía cinética) comprendida entre dos valores cualesquiera.

El método deductivo de Boltzmann, completamente general, abrió a otros el camino para definir gases de partículas que como los electrones o los fotones, tienen restricciones particulares en la ocupación o en la conservación de su cantidad. De esta importante característica de generalidad se aprovecharon los físicos Fermi, Dirac ,Bose y Einstein para producir las estadísticas de electrones y fotones que llevan sus nombres. Sobre ellas hablaremos a la brevedad, pero antes volveremos a nuestra antigua amiga : la entropía.

Otra vez la Entropía (una historia de parecidos)

Del estudio estadístico para conglomerados de partículas, o “gases” genéricamente hablando, Boltzmann obtuvo una ampliación estadística del concepto macroscópico de entropía.

Tratemos de imaginar, como hemos venido haciendo en estas páginas, cómo puede haber sido la línea de pensamiento empleado por nuestro simpático austríaco (los austríacos son en general simpáticos y amables)



Boltzmann tiene su escritorio en el primer piso de su casa, sobre la Erdberger Strasse, en Viena. Cansado de trabajar con complexiones y estados, decide distraerse mirando un poco por la ventana. La abre y se asoma un poco. Pasa la gente bulliciosa y sube un olor a masas recién horneadas. Es malo para la silueta vivir arriba de una pastelería, piensa. Por la vereda pasa una linda jovencita de cara con rasgos familiares. Escucha que un mozo la llama: ¡Froilen Roderer! . Claro! debe ser hija de Frau Roderer, la costurera. Esa nariz, esa boca..., no cabe duda que tiene un aire de familia. Cierra la ventana. Me tomaré un té con masas, decide. Pero su vista tropieza con la fórmula escrita por él hace un rato. P=..... ¡La probabilidad de una estado de distribución de energías de las partículas de un sistema, que es máximo en el equilibrio!. Había venido trabajado con esa probabilidad que siempre supuso máxima, o por lo menos tendiendo a un máximo. Al punto se acordó de otra cosa que tendía a un máximo. Y exclamó ¡Ah,.. los aires de familia! Esta P me recuerda a aquella S! Demasiado parecidas son para no tener nada que ver. Veamos..... Olvida el te con masas y saca un volumen de Termodinámica. Lee en seguida: S=S1+S2+S3...(S=entropía). “La entropía de un conjunto de sistemas es la suma de las entropías individuales de cada uno”. ¡Con la probabilidad no ocurre lo mismo! La probabilidad de una serie de sucesos independientes es el producto (no la suma) de cada probabilidad individual, así que P=P1xP2xP3 ¿Cómo hago para transformar un producto en suma? Pues aplico logaritmos. Si P y S tienen algo que ver, que seguro lo tienen, están relacionadas logarítmicamente. Toma un lápiz y escribe: log P = log(P1xP2xP3) = log P1 + log P2 + log P3 o sea que S = $\log_B$ P para alguna base de logaritmos. Ya averiguaré que base B de logaritmos conviene tomar para que $P=B^S$ y $\log_e P = S.\log_e B$, o bien $S = k.\log_e P$, con $k=1/\log_e B$

Días después, con la ventana de su despacho bien cerrada para no distraerse, Boltzmann deduce que la constante que le faltaba determinar para completar su fórmula valía $k=R/N_A$ para R=8,33 J/ºK/mol (constante universal de los gases) y $N_A=6{,}02\times10^{23}$ (Número de Avogadro)

No sabemos si fue el propio Boltzmann el que bautizó a P como la “probabilidad termodinámica” y a k como “constante de Boltzmann”

-o-o-o-

Radiación térmica

W. Wien y M. Planck

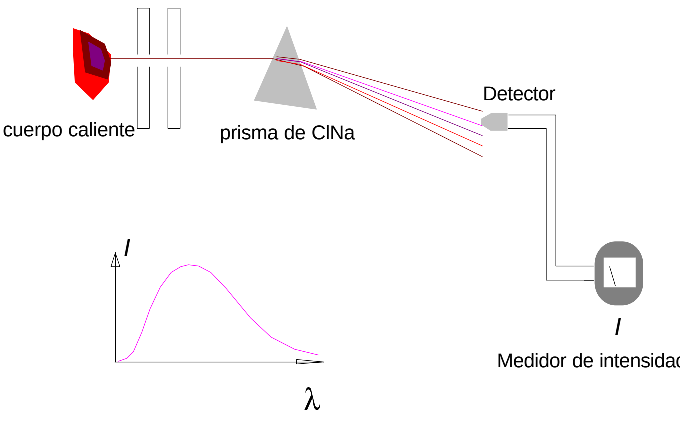
Algunos libros de física presentan al alemán Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), el creador de la teoría cuántica, como a un mago de la ciencia. Dicen más o menos que "el 14 de diciembre de 1900 Planck publicó un famoso informe sobre el espectro de radiación del cuerpo negro postulando que la radiación calórica se emite en paquetes o cuántos indivisibles". "Éste descubrimiento le valió el premio Nobel de física año 1918". Y punto. Ni una palabra de cómo había sido el proceso que lo llevó a tan importante conclusión. Como si lo hubiera soñado una noche de verano.

Lo de Planck no fue un sueño sino un ejemplo brillante de cómo nace un descubrimiento científico. Sin ánimo de desmerecerlo, he tratado de desentrañar cómo elaboró en realidad Planck su famosa teoría.

Planck sabía mucha física y muchas matemáticas prácticas. Había estudiado a fondo el tema de la radiación de los cuerpos calientes. Esa misma radiación que nos llega del sol, permitiendo la vida en la tierra, que cocina un cordero al asador o que calcina en verano a nuestro auto estacionado. Sabía que en definitiva la radiación de los cuerpos calientes es radiación electromagnética de longitud mayor que la luz, emitida por los átomos de sus paredes.

Conocía los estudios de otros físicos que habían abierto el camino y llegado a las fórmulas y conclusiones que sirvieron de base a su razonamiento : podemos nombrar a Kirchoff, Stephan, Boltzmann y principalmente a su compatriota Wien.

Wilhelm Wien, (1864-1928), fue también premio Nobel 1911 por sus trabajos sobre la radiación. Estudiando a la radiación térmica como un fluido, le aplicó los principios de la termodinámica. En su "termodinámica de la radiación", estudia la evolución de una cavidad caliente siguiendo un ciclo de Carnot y llega a tres fórmulas importantísimas: La ley del desplazamiento, la ley de Stephan (o de la cuarta potencia) y la ley de la quinta potencia. Por estar basadas en la termodinámica macroscópica de Carnot nos dan información global sobre cómo debe ser la radiación total de un cuerpo. Pero la termodinámica clásica no puede informar sobre la distribución de la energía radiante en un espectro, así como vimos que tampoco pudo dar datos sobre distribución de energías en un gas.



Distribución de la intensidad

Le preguntamos a Wien:

- ¿Qué tiene que ver un gas con el cuerpo radiante?

- ¡Muchísimo!: es casi lo mismo. Fijémosnos en la curva de distribución de la energía en un espectro de un cuerpo emisor. Esta curva se obtiene abriendo la radiación que proviene de un cuerpo caliente en un prisma o red de difracción. Se obtiene así un "espectro" o sea un arcoiris de calor. Paseamos un detector puntual por el espectro, y anotamos la energía en base a la posición. La posición en un espectro es proporcional a la longitud de onda de la radiación. Trazamos una curva y oh, sorpresa: tiene la misma forma que la de distribución de las moléculas de un gas.

- Disculpe, profesor Wien, pero no nos damos cuenta qué tiene que ver un gas con un pedazo de carbón incandescente.

- Pero muchachos, ¡piensen un poco! : el hecho de que las curvas tengan la misma forma acampanada nos habla de fenómenos análogos. El modelo debe ser el mismo o parecido. La Naturaleza no se gasta en hacer dos cosas parecidas porque si. O mejor dicho, no hay dos cosas parecidas que no puedan representarse con modelos parecidos. Así que manos a la obra. Apliquemos a la radiación una distribución de Maxwell-Boltzmann.

- ¿Como dijo? - saltamos todos.

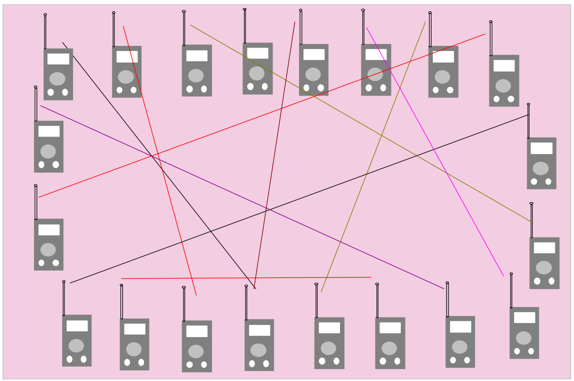
- SI., Oyeron bien: UNA DISTRIBUCIÓN DE MAXWELL-BOLTZMANN.

- Pero ¿de qué partículas me está hablando, Sr. Wien?.

- De un gas de radiadores elementales.

- ¿Y eso que significa?

- Que estudiamos estadísticamente a una gran cantidad de átomos o moléculas que vibran desordenadamnte por efecto de la temperatura en un cuerpo. Son como diminutos aparatos de radio munidos de sus pequeñas antenas, que emiten y reciben.



MOLDELO SIMPLIFICADO DE CAVIDAD RADIANTE

Wien nos sigue explicando: Consideren qué pasa en el interior de un horno: las paredes de esta cavidad caliente están tapizadas de estas miniradios operadas por miniradioa-ficionados (átomos o moléculas del material caliente de las paredes), que curullan continuamente unos con otros, o sea que emiten y reciben radiación. Cada uno de ellos está sintonizado a una determinada frecuencia, transmitiendo y también absorbiendo esa frecuencia (digamos que cada uno está en un determinado punto del dial). ¿De donde proviene la radiación que absorbe?. De todos los otros radiadores presentes que están sintonizados en ese punto del dial. Se establece así un intercambio de radiación en cada frecuencia, y para cada punto del dial existe un equilibrio estadístico. El "éter" dentro del horno caliente (o cavidad radiante) está surcado por ondas en un intervalo de frecuencias continuo, resultado del intercambio de energía radiante entre el "gas de osciladores" de las paredes.

Entre los presentes está el presidente del Radio Club Argentino, A.V. y pregunta:

- Sr Wien: los radioaficionados gustamos "curullar", esto es recorrer el dial (dentro de nuestra banda permitida) escuchando y transmitiendo. ¿Los osciladores elementales tienen una frecuencia fija o pueden cambiarla a voluntad, moviendo el dial?.

- Buena pregunta, señor A.V.: Los osciladores elementales emiten y reciben energía electromagnética. La fuente de alimentación viene inicialmente del combustible del horno o del gas caliente que los zamarrea haciéndolos vibrar. Si apagamos el fuego y cerramos la boca del horno queda una cavidad radiante en equilibrio. Allí, cuando los osciladores emiten pierden energía. Los que saben radio, como Vd. A.V., amigo mío, saben que la energía de un oscilador depende de la amplitud de la oscilación y su frecuencia. Sin embargo como veremos luego, se sabe a través de los datos experimentales que en estos osciladores elementales (átomos vibrantes) la amplitud es fija y sólo varían su frecuencia. Aumentan la frecuencia cuando les "cae" desde el espacio una onda en resonancia que puedan absorber. Así mueven el dial nuestras miniradios. Por supuesto, en forma totalmente casual.

Ante nuestro interés, Wien prosigue:

- Ahora bien, ustedes me preguntarán ¿cómo se distribuye la frecuencia en la población de osciladores? ¿Cuántos radioaficionados microscópicos transmiten y reciben entre 10 y 15 cm de longitud de onda? ¿Cuántos entre 15 y 20?. Estamos hablando de promedios estadísticos, porque se entiende que individualmente la población cambia constantemente de frecuencia, así como las moléculas de un gas cambian constantemente de energía al chocar entre sí.

- Entonces hay que aplicar una distribución de Maxwell-Boltzmann - coreamos todos.

Visiblemente satisfecho, el profesor Wien pregunta:

- ¿Tenemos derecho a suponer que los osciladores son entes distinguibles e iguales, como las moléculas de un gas, y aplicarle la estadística de Maxwell-Boltzmann?.

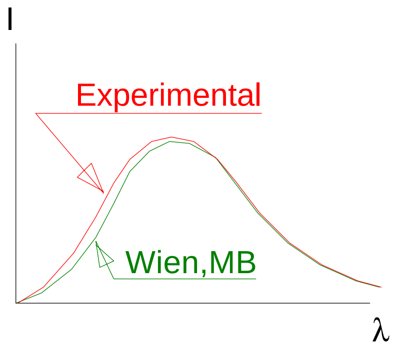
- Seguro, y también porque mantienen su número constante - agrega uno de nosotros.

Nos sonreímos unos a otros, comentando lo fácil que son la cosas en física. Pero nos dura poco la alegría, porque Wien nos anuncia:

- No tan rápido, señores, porque la curva experimental de la densidad espectral, relevada con todo cuidado, no tiene la forma exacta de una MB.

- ¿Ah, no? - ¿Es diferente? - preguntamos inquietos.

- No muy diferente, pero lo suficiente para el Sr. Planck no se conforme y haga retoques en la fórmula de MB para que se ajuste exactamente.



En realidad debo decirles que la intensidad captada por un detector de radiación que se pasea por el espectro da lo que se llama “densidad espectral”. La densidad espectral no es lo mismo que la distribución de energía de los osciladores. Tiene que ver con ella pero *son dos cosas diferentes*. Así que en principio NO tiene porqué ser una ley MB. Sin embargo, al ver la forma acampanada de la curva se me ocurrió en principio que también la distribución de energía de la radiación podría expresarse con una fórmula tipo MB. Aunque no quiero meterlos en fórmulas, les diré que la curva real tiene la subida un poco más empinada que la campana de MB, y que ello se corrige, como propuso mi colega y amigo Planck, restando una unidad en el denominador: al hacer el denominador menor, la fracción aumenta, pero sólamente en el primer tramo, como se hace menester.

- ¿Y por qué no sube toda ella? - pregunta un curioso.

- Porque cuando el denominador es grande un ***1*** no le hace nada, en cambio cuando es chico la unidad tiene su peso.

Para el que hizo la pregunta el asunto está claro, pero para otros no. Wien se da cuenta de ello al ver subir desde el auditorio un gas de signos de interrogación de diferentes tamaños.

- ¿Quieren que se los explique realmente? Ello me obligará a escribir fórmulas y no se si a Vds....

El valor de la entrada a la conferencia que nos está dando el Dr. Wien es de $50.- Todos queremos lo máximo a cambio de nuestro dinero, aunque sean fórmulas.

- Si, Si! - piden todos.

- ¡Sea: aquí van las fórmulas!, dice Wien, y comienza con la explicación escribiendo en el pizarrón:

La curva de Maxwell-Boltzmann proviene de una fórmula del tipo

$$\mathbf{I=A.f(\varepsilon)/e^{\varepsilon/kT}}$$

A y k son constantes (k:constante de Boltzmann)

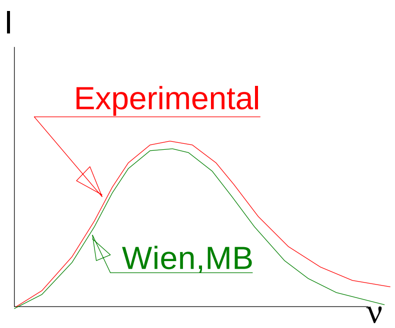
T es la temperatura absoluta de la masa de gas molecular o la que reina en la cavidad.

e = 2,7182.. es la base de los logaritmos naturales

ε = energía de la partícula, en este caso el oscilador elemental.

I es la densidad espectral

f(ε) es una función de la energía de la partícula, independiente del tipo de partícula (es la misma para moléculas que para electrones). Los estadísiticos la llaman “densidad de estados posibles”. Representa la cantidad de estados disponibles o casilleros de energía ε. El resto de la fórmula representa la probabilidad que el estado esté realmente ocupado por una partícula. De tal manera I está compuesta de dos factores: la cantidad de casilleros de energía y la probabilidad que exista una partícula en tal energía. Esta última parte depende del tipo de partículas. Para moléculas vale $\mathbf{A/e^{e/kT}}$, para electrones vale $\mathbf{A/(e^{e/kT}+1)}$, y para unas partículas muy curiosas llamadas fotones vale $\mathbf{A/(e^{e/kT}-1)}$



Las abscisas de la curva experimental son longitudes de onda (λ). También puede graficarse en función de la frecuencia (ν), recordando que ν=c/λ para c=velocidad de la luz ¿Ustedes querían fórmulas, no?. Bueno....entonces si graficamos en función de la frecuencia nos da otra curva acampanada que se puede ajustar bastante bien con la siguiente fórmula:

$$\mathbf{I=A.f(n)/e^{h.n/kT}}$$

o sea que si la comparamos con la función de MB anterior resulta:

$\mathbf{e=h.n}$, lo que nos dice que la energía del oscilador es proporcional a la frecuencia de la radiación emitida.

La constante h se llama “constante de Planck” , en honor a mi colega, que fue el que dio el toque de ajuste a la fórmula anterior para que se adaptara a los resultados experimentales. Se logra un ajuste asombrosamente perfecto haciendo:

$$\mathbf{I=A.f(n)/(e^{h.n/kT}-1)}$$

Me gustaría que él mismo les explicara qué línea de razonamiento usó para llegar a las importantes conclusiones.....

En ese momento entra un señor gordito, medio pelado. De un salto sube al estrado donde está Wien escribiendo y tocándole el hombro le pregunta:

- ¿Me llamó Vd, profesor?

Wien se da vuelta y lo mira, abriendo la boca:

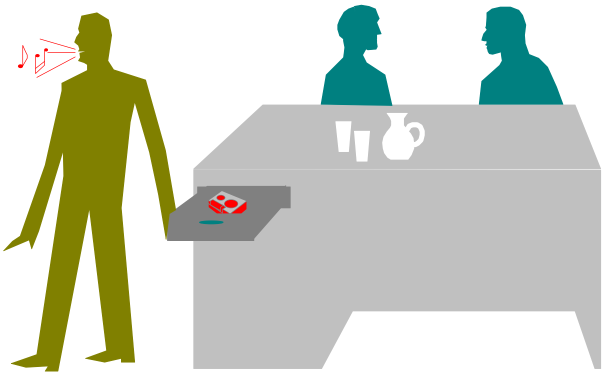
- ¡Usted! ¡Herr Prof. Planck en persona!

Inmediatamente se dirige al auditorio: - Señores, hagamos una pausa para tomar un café y en veinte minutos seguimos.

Intermezzo

Cuando los asistentes se retiraron, unos a tomar café, otros a caminar o fumar un cigarrillo, Wien y Planck comenzaron a conversar animadamente.

Sin que ellos lo advirtieran, dejé un minigrabador funcionando cerca de ellos y me alejé con los demás. En el casete quedó registrado este jugoso “intermezzo” operístico:



W - Se presentó Vd. el otro día en el salón de la Sociedad de Físicos y lanzó una verdadera bomba: ¡Qué la radiación se emite por paquetes indivisibles o cuántos!

P - Bueno,... no es una bomba. Sólo presenté las conclusiones de mi trabajo.

W - ¿No podría ahora ante este auditorio selecto explicar cómo llegó a ellas?.

P - Disculpe amigo, pero me niego a ello. Fue tan sencillo que si se conociera cómo llegué a la hipótesis cuántica perdería ésta su halo de misterio. Ya sabe Vd. que en física, como en otros campos, el misterio hace maravillosas las cosas más triviales.

W - Tiene razón. Pero por lo menos cuéntemelo a mí.

P - Si me promete no divulgarlo.

W - No diré palabra a nadie.

P - Bueno: recordará que para ajustar su fórmula a los resultados experimentales ensayé restar un uno en el denominador. Con ello se curó. La desviación no disminuyó: simplemente desapareció. Evidentemente en el “menos uno” había un significado profundo. Y entonces, de repente lo vi todo claro, muy claro.

W - ¿Qué vio claro, Herr Doktor?

P - Que lo que quedaba era la fórmula de la suma de una serie geométrica de razón r, como la que estudiamos en álgebra del Gimnasio (el colegio secundario). $S=1/(1-r)=1+r+r^2+r^3$....Si hace el desarrollo en serie de I verá que cosa interesante.....

Rápido como el rayo, Wien ya estaba escribiendo:

$$\mathbf{I = A.f(n)/(e^{h.n/kT}-1) = A.f(n).e^{-h.n/kT}/(1-e^{-h.n/kT}) =}$$

$$\mathbf{=A.f(n).e^{-h.n/kT}(1+e^{-h.n/kT}+e^{-2h.n/kT}+e^{-3h.n/kT}+...+e^{-nh.n/kT}+..)}$$

P - Vea Vd. que esos exponentes nos gritan que la radiación es el resultado de una suma de términos con energías múltiplos de una fundamental hν, un paquete indivisible o “quantum”.

W - Es decir que no hay posibilidad de que un oscilador emita una energía fraccionaria de quantum: o uno, o dos, o tres, pero no tres y medio. Estos cuántos tienen una energía muy pequeña ¿no?

P - Claro, muy pequeña, porque aunque la frecuencia sea enorme, mi constante h es extremadamente chica. El producto sigue siendo ínfimo.

W - Por eso a escala macroscópica el salto o discontinuidad en la emisión de energía radiante no se nota.

P - Pero a escala atómica o microscópica si Vd. prefiere, el asunto cambia. El oscilador se comporta como un emisor cuyo volumen funcionara por puntos en vez de un potenciómetro continuo.

Empezaron a entrar los asistentes, entre los que yo me encontraba. Wien y Planck borraron apresuradamente lo que habían escrito en el pizarrón, pero mi cámara de bolsillo ya lo había registrado. Me hice el distraído mientras me llevaba el grabador oculto. Cuando nos hubimos sentado, Wien se dirigió al auditorio presentando a Planck quién comenzó diciendo:

- Verán, señores, es largo de explicar cómo llegué a que la radiación se emite en paquetes o cuántos, así que me limitaré a exponer los resultados de esta importante hipótesis.....

En ese momento apagué el grabador, confiando en que lo que buscaba había quedado registrado, como realmente lo fue.

Otra vez el "yo creía"

En lo que siguió de la disertación se trató lo que muchos ya saben: Que si la emisión era en paquetes, cómo sería la transmisión. No necesariamente los paquetes debían viajar en el espacio como tales. Planck no *creía* que esto fuera así, sino que *le parecía* que los cuantos se fundirían en una sola onda continua al salir del emisor, llegando como tal al receptor. La absorción, según Planck, sería continua. En este aspecto, el gran sabio se comportó al estilo de los antiguos o de muchos de nosotros empleando la filosofía del "me parece".. Si mi padre hubiera estado, quizás hubiera hecho notar el peligroso proceder, y de paso yo hubiera quedado ante él a la altura del gran Planck. Una vez más los resultados posteriores demostraron que el parecer sin fundamento sólido produce el mismo resultado que una moneda a cara o ceca: se acierta a veces y a veces no.

Einstein y el efecto fotoeléctrico

Años después Einstein demostraba la necesidad de que los paquetes o cuántos siguieran existiendo durante el viaje hasta el receptor, ya que probó que éste absorbía la radiación discretamente, de a un cuanto por vez.

Se describía en tiempos de Einstein el siguiente fenómeno: la radiación ultravioleta descargaba un condensador (dos placas metálicas separadas por aire cargadas eléctricamente con iguales cargas eléctricas de diferentes signos). La explicación era que la radiación arrancaba electrones al incidir sobre el metal de la placa. Los electrones libres que salían de la placa negativa le iban restando carga y eran atraídos por la placa positiva cuya carga iban neutralizando.

El estudio detallado del fenómeno reveló que el efecto se cortaba por debajo de una frecuencia independientemente de la intensidad de la radiación. En cambio reaparecía si se superaba este valor crítico de frecuencia, verdadero umbral debajo del cual no se producía.

La explicación que se le ocurrió a Einstein fue que el proceso de arranque del electrón desde el metal sería discontinuo: un cuanto arrancaba un electrón en una transferencia discreta. Como el cuanto tenía una energía $h\nu$ si la frecuencia ν bajaba de un valor límite, no alcanzaba a extraer al electrón del seno del metal, el que necesitaba por lo menos esa energía para vencer la energía de potencial que lo retenía adentro.

Recordemos que en el interior de un metal hay un "gas" de electrones que no saltan afuera de esa botella metálica si no superan la energía que los retiene, a la que Einstein llamó "potencial de extracción". Para los metales pesados la barrera de energía es alta, lo que se reconoce por que la radiación capaz de producir arranque electrónico debe ser muy energética (ultravioleta). Los metales alcalinos (sodio, potasio, etc.) tienen una estructura interna con una barrera menor, y la luz visible (por ejemplo la amarilla, de frecuencia menor que la ultravioleta) ya es capaz de arrancar electrones.

Que el proceso de transferencia de energía era cuántico, o sea en paquetes discretos de a uno por vez, era evidente según Einstein ya que no producía ningún efecto la energía que podría resultar del concurso sucesivo de paquetes de energía menor a la necesaria, que vale $h.\nu_{límite}$

También el tiempo desde que se comenzaba a iluminar hasta que se iniciaba la emisión electrónica, medido con gran precisión, era mucho menor que el necesario para absorber la energía en un proceso continuo.

Un ejemplo aclaratorio: Supongamos que llenamos un tanque de 30 litros de dos maneras diferentes: la primera con 6 baldazos de 5 litros cada uno echados de golpe a razón de uno por segundo; la segunda con un chorro continuo de 5 litros por segundo. En ambos casos llenamos el tanque en seis segundos, pero si el método es discontinuo veremos subir el nivel en escalones: cuando cae el balde sube el nivel casi de golpe y luego pausa. El chorro continuo produce un llenado gradual sin pausa, pero también sin la rápida subida del baldazo. Igual que en el llenado a balde, se reconoce en el efecto fotoeléctrico el proceso cuántico por la rapidez entre la llegada de la radiación y la consecuente salida del electrón.

En otras palabras, era evidente que no existía proceso de acumulación de energía y si en cambio una transferencia discreta o “cuántica”

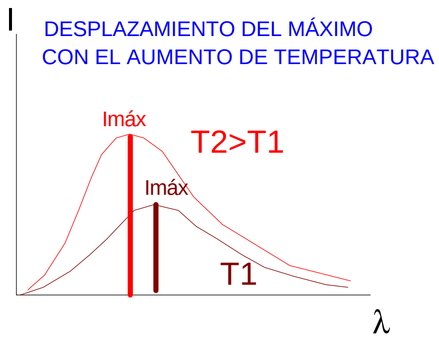
El fotón

Pensó Einstein que si el paquete sale y llega intacto como encomienda de correos, era probable que se mantuviera su identidad en el camino. Ese paquete o “tren de ondas” surcaría el espacio a la velocidad de la luz y debería poseer cualidades de partícula, por ejemplo cantidad de movimiento e inercia. Se explicaba así que un gas de esas partículas produjera un presión de radiación. Recordemos que Wien estudió las evoluciones de ese gas en un ciclo de Carnot, deduciendo leyes macroscópicas ya conocidas experimentalmente.

El propio Newton ya había propuesto que la luz estaba formada por corpúsculos. No se le ocurrió sin embargo que fueran de naturaleza ondulatoria, a pesar de conocer los experimentos luminosos de difracción e interferencia por otra parte propios de las ondas. En cambio el estudio de la radiación de un cuerpo emisor y el efecto fotoeléctrico permitieron llegar más lejos: al carácter dual partícula - onda.

Las partículas luminosas de Newton así disfrazadas de ondas fueron bautizadas por Einstein como “fotones”. Que a los fotones se los pueda llamar partículas está justificado porque siguen un comportamiento estadístico preciso, con propiedades bien definidas: En efecto, aplicando los criterios de Boltzmann para hallar el estado más probable en un gas de elementos iguales, indistinguibles, no excluyentes y que no mantienen su número, se llega a una distribución de energía parecida a las de las moléculas de un gas. La diferencia es precisamente un “menos uno” en el denominador, el mismo que Planck aplicó como remedio para curar a la fórmula de Wien. Un “menos uno” que si se aplica de facto lleva a la hipótesis cuántica. Un “menos uno” que aparece cuando se plantea un modelo de fotones.

Los fotones son partículas muy especiales: todas de la misma velocidad se diferencian entre si sólo por su frecuencia. Su número no se mantiene constante aunque en una cavidad exista equilibrio, ya que brotan fotones de algún lugar de las paredes radiantes y se sumen en otros lugares, así como estadísticamente nacen y mueren individuos en una población estable. Su número fluctúa alrededor de un valor medio que es el que se mantiene. Si el horno se calienta, la densidad de fotones aumenta. Si se enfría, disminuye.



Con la variación de la temperatura promedio del horno varían también las características de la distribución espectral: siempre acampanada, la curva desplaza su máximo hacia longitudes de onda menores (frecuencias mayores) con el aumento de temperatura (ley del desplazamiento de Wien). El área debajo de la curva de distribución, que es una medida de la energía total irradiada, aumenta con la cuarta potencia de la temperatura absoluta, coincidiendo con la ley experimental de Stephan. El máximo de energía del espectro crece con la quinta potencia de la temperatura. Todas estas propiedades macroscópicas se cumplen tanto para la fórmula de Wien como para la de Planck, porque el "menos uno" no pesa en las caracterísiticas globales: apenas importa un poco en la distribución, como ya vimos. Sin embargo sin esa resta la energía fluiría continua, cosa que la experiencia niega.

GASES DE ELECTRONES

En estos relatos de ficción puse en boca de Wien que los electrones seguían una estadísitica del tipo $\mathbf{I=A.f(e)/(e^{e/kT}+1)}$.

En realidad fueron Fermi y Dirac en 1920 los que aplicaron los razonamientos de Boltzmann a los electrones y dedujeron dicha expresión.

Recuerdo que en cierta oportunidad tuve el siguiente diálogo con uno de mis alumnos.

- Profesor ¿Podría explicar brevemente como se llega a la fórmula de distribución de un gas de electrones?

- Con gusto. Para llegar a esa fórmula debe considerar que los electrones son partículas a las que no les gusta apiñarse.

- ¿Se refiere Vd. al principio de exclusión de Pauli? - preguntó el bien informado interlocutor.

- Exactamente, amigo. Los electrones no soportan estar en un mismo estado de energía. Vd. lo aprendió en química. No sólo en el átomo sino en cualquier parte rige el lema del electrón: Uno solo por cada casillero: son unos bacanes.

- Así que cuando hay dos electrones con la mismo estado de energía uno de ellos salta a otro estado.....¿y si no hay lugar cerca?

- ¿Nunca tuvo la agradable experiencia de viajar en primera con boleto de turista?

- ¡Pues si, señor!. Una vez sobrevendieron pasajes en el avión y me mandaron a primera. ¡Qué vida, qué atención exquisita!

- Algo parecido a lo que le pasa al electrón que llega y encuentra su nivel ocupado. Lo pasan a primera, es decir a donde haya lugar, aunque en realidad tenga pasaje de energía inferior. A las pobres moléculas de un gas en cambio no les pasa lo mismo. Si están cerca del cero absoluto se tienen que hacinar en los primeros casilleros: una situación que provoca condensación.

- Siempre cabe una más, como en el colectivo 37 - acotó el muchacho.

- Mi última experiencia de condensación humana la tuve en el 152. Casi hacemos explotar el colectivo, porque era verano y estábamos sobre la temperatura crítica....Bromas aparte me parece que el modelo es acertado.

- El profesor de Química, Dr.A. compara la ocupación de los electrones en el átomo como la de un estadio: llega el público y se va acomodando llenando las gradas desde la más baja a la mas alta.

- También es muy buena la comparación. Tanto que estoy pensando en encontrar en el átomo lo análogo a la avalancha en el fútbol. Bueno, lo cierto es que si planteamos el razonamiento de Boltzmann con estas partículas tan educadas, el gas resultante tiene propiedades parecidas a un gas molecular si está suficientemente enrarecido. Pero si el gas electrónico está cerca del cero absoluto, lejos de haber condensación, existen electrones de altas velocidades que no pueden ocupar las gradas inferiores ya llenas con otros electrones.

- ¿Dónde se aplica el modelo de gas electrónico?

- Pues, en electrónica. Gracias a él fue posible el desarrollo y perfeccionamiento del transistor y sus derivados de estado sólido. Dentro del silicio o germanio de estos elementos existe una gas de portadores (electrones o huecos) que cumple la distribución de Fermi-Dirac.

- Es increíble.... Pensar que gracias a esos modelos podemos escuchar en alta fidelidad.

- Eso no es nada, también los equipos a válvulas eran de alta fidelidad. Pero el diseño y fabricación de microprocesadores, memorias y otros microcircuitos serían imposibles sin esa teoría. Detrás de un sofisticado equipo de comunicaciones satelital, en una computadora, debajo del pupitre del tren bala o dentro del ingenio espacial a punto de abandonar el sistema solar, hay sueños de sabio y de niño: unas fichas de lotería en unos cartones....

-o-o-o-

Átomos y Físicos

Que la materia es discontinua ya lo intuían los griegos. En el año 400 AC Demócrito propuso que la sustancia está compuesta por partículas indivisibles o átomos (de a: partícula privativa y tomos: cortar). "Sólamente existen los átomos y el vacío" había dicho.

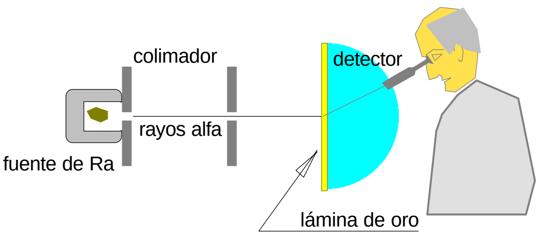
Del dicho al hecho hay mucho trecho, y recién Rutherford en 1919 dio pruebas de esa estructura casi vacía que intuyó el genial griego. Los estudios físico-químicos ya en 1919 indicaban que ni los átomos ni su trama (red cristalina, por ejemplo) eran visibles ópticamente aún con los mejores microscopios. Dada su pequeñez debían pues realizarse ensayos diferentes a la observación.

Ver es estudiar imágenes, que son a su vez producto de la interacción entre luz y objeto observado. Cuando el objeto posee un tamaño comparable al de la longitud de onda de la luz empleada para iluminarlo, no obtendremos imagen.

¿Cómo podemos saber la estructura de algo sin verlo?. Un método es hacer que interfiera con algún otro agente exploratorio diferente a la luz, y reconociendo luego la reacción entre el agente y el objeto estudiado. La trama del agente debe ser del orden de la trama a observar.

Así, palpar con nuestra mano es un medio de reconocimiento apropiado de objetos grandes en la oscuridad. Si los objetos son más pequeños debemos palparlos con los dedos. Si el objeto tiene una trama muy fina, como en el caso de una red de átomos, ni la luz aún con su pequeñísima longitud de onda (medio micrón) es capaz de "dibujar" su estructura.

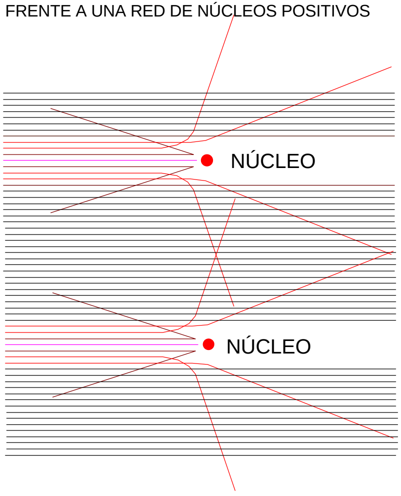
El agente puede ser en cambio una lluvia de partículas muy finas que interfieran con las partes llenas de la cosa que estudiamos. Algo así como estudiar una alambrada de cuadros grandes arrojándole pelotas de tenis. Algunas pasarán, otras interferirán con la malla: del estudio estadístico del resultado de este bombardeo podrá inferirse el tamaño y disposición de los alambres.



ESQUEMA DE LA EXPERIENCIA DE RUTHERFORD

Bueno, algo así imaginó Ernest Rutherford cuando usó un trozo de radio como fuente de proyectiles alfa contra una lámina de metal muy fino. La diferencia fundamental entre un proyectil y una partícula alfa es que ésta tiene carga eléctrica positiva además de masa; sólamente es de esperar un choque o colisión de las susodichas partículas contra algo neutro o cargado negativamente. Rutherford sabía ésto y que además habría una interacción diferente al choque con la materia cargada positivamente. Razonó que si el metal era una masa neutra compacta, como se *creía* entonces, pasarían muy pocas partículas, rebotando o absorbiéndose la mayoría. Si en cambio el cristal metálico era una trama de núcleos separados por espacios, habría partículas que pasarían y otras que se desviarían por repulsión electrostática, ya que núcleos metálicos y partículas alfa están cargados eléctricamente con signo positivo. La trayectoria de dos cuerpos que se repelen con la ley de Coulomb es una hipérbola. Rutherford también sabía que las partículas

TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS ALFA FRENTE A UNA RED DE NÚCLEOS POSITIVOS



alfa se neutralizarían con la parte negativa de la materia dando átomos neutros de helio.

Es decir que nuestro amigo Rutherford estaba adecuadamente preparado para interpretar los resultados de su muy bien planeado experimento.

Resultó del mismo que casi todos los proyectiles pasaban, algunos se desviaban siguiendo una pauta de movimiento central (hiperbólico) y poquísimos eran rechazados por la materia. ¡Una lámina de oro como las que se usan para dorar cantos de libros era permeable a una lluvia de pequeños proyectiles cargados! Sin duda su estructura era casi vacía, a pesar de ese aspecto compacto a la vista que le daba una radiación electromagnética de medio micrón. ¡Qué engañosa es la vista!...¡Habrá que aprender a ver con otros ojos y otras luces!

Aprovechando nuestro carnet de periodista itinerante en el tiempo, nos acercamos a Ernest Rutherford en su “Cavendish Laboratory” de Inglaterra.

Periodista - Profesor Rutherford, ¿no es extraño que su experimento de interacción entre rayos alfa y lámina de oro no de noticias de cargas negativas?

Rutherford - ¿Se refiere Ud. señor a que los resultados se ajustan a un modelo de lámina de oro formada por cargas positivas muy separadas entre sí?

P - Exacto. Y sin señales de cargas negativas. Si las hubiera, se observarían proyectiles desviados según hipérbolas de acercamiento.

R - No necesariamente. Si las partículas chocan con la parte negativa de la materia se neutralizarán, formando helio gaseoso. Realmente eso SI se observa de verdad.

P - Pero si hubiera cargas negativas concentradas en núcleos, como las positivas....

R - Entonces habría, como Vd. bien dice, un movimiento central de atracción. La experiencia no da en efecto ninguna señal de ello.

P - Sólo de repulsión. Quiere decir que no hay cargas negativas concentradas.

R - Parecería que no las hay concentradas, en efecto. ¿En qué otra forma podrían estar?

P - Soy periodista, no físico, pero en tren de imaginar propongo un gas de electrones.

R - Esa es una buena hipótesis: electrones deambulando alrededor de los núcleos. Una carga distribuída, desde el punto de vista macroscópico. Buena para un metal. Quizás no tan buena para un elemento liviano, con menos electrones. En ese caso se me ocurre que hay electrones orbitando alrededor de un núcleo. Esas cargas concentradas negativas en movimiento central son para los proyectiles una carga distribuída.

P - Sé que le han objetado, profesor, que una carga con movimiento circular es un oscilador electromagnético que emite energía, y que la materia no radia de acuerdo a ese modelo.

R - Estoy de acuerdo con la objeción: la materia radiante que estudió Planck no emite a nivel atómico sino a nivel molecular, por vibración de estructuras más complejas (los famosos osciladores elementales). Sé que los átomos emiten espectros de rayas, discontinuos, como bien lo saben todos los físicos que experimentan con esos célebres tubos de gas excitados eléctricamente.

P - ¿Y entonces, profesor, qué solución le damos al asunto?

R - Mi amigo Niels Bohr propuso algo que parece descabellado, pero no lo es tanto. Le sugiero que lo entreviste directamente a él: lo va a atender si dice que va de mi parte. Tómese el Tempometro en la estación Charing-Cross y pida un pasaje a Copenhague/1912

Costó trabajo que el subte del tiempo nos depositara exactamente diez años más tarde en Copenhague. Antes que eso, gracias a un operador desquiciado, fuimos a parar dos veces a la Alemania de Hitler, donde casi nos matan los bombardeos, y otra vez a la Argentina de Perón, donde Richter nos quiso convencer de las bondades de su proyecto en la isla Huemul.

El bondadoso Bohr nos atendió en 1912, y nos explicó el tema de su próximo trabajo: el modelo atómico.

Bohr: - Señores, lamento que se hayan perdido en el Tempometro antes de encontrarme. Pero estamos por fin aquí y ahora. ¿Así que Rutherford sabía ya en 1903 de mi proyecto?

Periodista - Nos dijo que Vd. nos lo explicaría. No quiso interferir antes de tiempo.

B - Muy discreto y considerado de su parte. Hay que tener cuidado con alterar el ritmo de los acontecimientos naturales. Bien, señores, les explico que el modelo de Rutherford era inconsistente porque emitía radiación continua en vez de las series de frecuencias que Balmer, Lyman y otros ópticos fueron descubriendo en la radiación de elementos excitados. Eso suponiendo que de alguna manera se salvara el defecto más importante que es su inestabilidad intrínseca: un oscilador que emite y no recibe energía termina parándose, cosa que nuestros átomos no hacen.

P - ¿Qué es lo que no hacen, profesor Bohr? ¿No emiten o no se detienen?

B - No emiten espontáneamente, lo cual me hace pensar que en realidad están parados o “estáticos”. Ya sé que Vd. me dirá que si el electrón no gira, cae sobre el núcleo atraído por la fuerza electrostática: si no hay fuerza centrífuga, se precipita como un satélite al que algo detiene. A eso yo contesto que el modelo a escala atómica no tiene porqué responder a pautas macroscópicas.

P - ¿Supone que no hay atracción electrostática? ¿O que no hay emisión electromagnética?

B - Podríamos suponer que no hay emisión electromagnética. Es más cómodo. Pero también le sugiero que desarrolle Vd. un modelo suponiendo que el electrón está distribuido en una capa alrededor del núcleo. Esto no lo he hecho, pero supongo que puede funcionar. Me parece que lo propondrá Schrödinger dentro de poco, con algo que llamará la “función de onda”.

P - Veremos al Sr. Schrödinger, siempre que los expendedores de pasajes no nos manden a otro lado. Pero ahora aprovecharemos que estamos aquí, con Vd. querido profesor. En su modelo el electrón gira pero no emite, tengo entendido.

B - Gira y no emite si está en determinadas órbitas. Emite cuando salta entre órbitas permitidas. No existen electrones en órbitas inestables, fuera de las de “no emisión”.

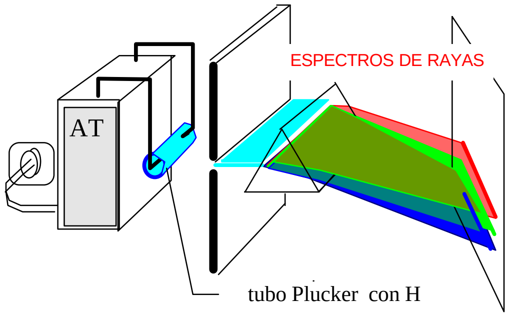
P - Y mientras están en tránsito entre dos órbitas estables, ¿emiten?

B - El tránsito es muy rápido. Diría que el electrón desaparece de un estado y aparece en el otro. A este salto le corresponde la absorción o emisión de energía radiante.

P - ¿Y cómo se le ocurrió que el salto es el responsable de la emisión?

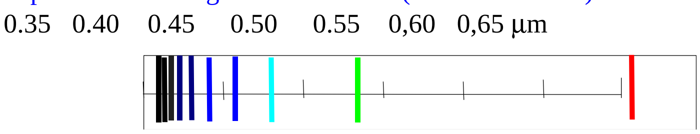
B - ¿Y qué otra cosa puede producir un salto de energía? : Una emisión cuántica. En realidad inventé un modelo que emite exactamente igual que el átomo verdadero: destellos rápidos de energía monocromática.

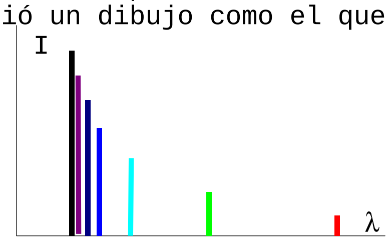
P - Lo cual produce un espectro de rayas....



B - A la frecuencia de las series de Balmer “et altri”. Elegí las órbitas a la distancia tal, que un salto entre ellas produce una variación de energía total del sistema que coincide con la del fotón de la serie. De esa condición necesaria surgió lo que yo presentaré mágicamente como mi “condición de cuantización”. Aquí tienen un gráfico del espectro del hidrógeno: (Y nos extendió un dibujo como el que sigue)

Espectro del Hidrógeno en el visible (Serie de Balmer)





La serie del hidrógeno tiene los siguientes valores experimentales de longitudes de onda:
Hα = 0,65631 µm Hβ = 0,48613 µm Hγ = 0,43405 µm Hδ = 0,41017µm Hlímite=0,3646 µm

Nosotros pensamos: El viejo truco de escamotear la línea de pensamiento para aparecer como un mago!. Pero nos mordimos la lengua, preguntando ingenuamente:

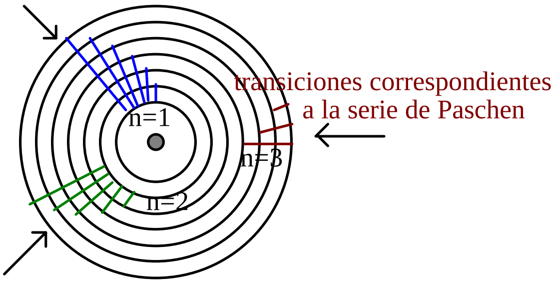
P - ¿Qué es la condición de cuantización, profesor?

B - Les diré: para que el sistema protón electrón emita la serie de Balmer del hidrógeno al perder energía, el electrón debe saltar entre órbitas determinadas de radio r. Para tales órbitas estables el momento de la cantidad de movimiento del electrón es un número entero de veces al constante de Planck dividido por “dos pi”.

Es decir que el “momento de la cantidad de movimiento” m.v.r no puede tomar valores cualesquiera, sino múltiplos de $h/2/\pi$

Y esa es la condición de cuantización de la cantidad de movimiento, o “drall”, como le dicen los ingleses.

transiciones correspondientes a la serie de Lyman



transiciones correspondientes a la serie de Balmer

P - ¿Y este modelo de “Rutherford-Bohr” funciona bien?. ¿Simula todas las rayas del espectro en todas las series?

B - Está hecho a la medida del hidrógeno. Para este elemento mi modelo reproduce bastante bien a las series de rayas en el visible, infrarrojo y ultravioleta. En los metales alcalinos no funciona tan bien. Para elementos más pesados es un desastre, cuantitativamente hablando. Pero Sommerfeld me prometió que lo va a arreglar: Parece que suponiendo órbitas elípticas en vez de las circulares que yo puse para simplificar, el modelo se cura bastante. Lo malo es que para reproducir exactamente los espectros de elementos pesados de la tabla periódica hacen falta otros refinamientos, por ejemplo cuantificar el momento magnético del electrón en órbita.

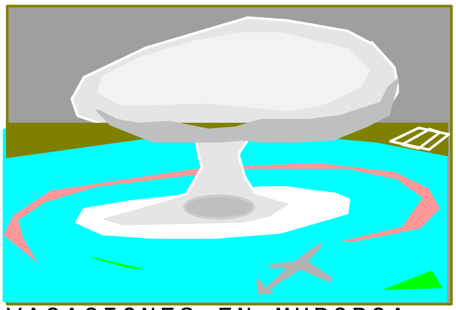
P - Nos imaginamos que la excentricidad de tales elipses está también cuantificada.

B - ¡Si, parece que así es!. ¿Cómo lo saben?...Ah, ya comprendo, son periodistas que viajan en el tiempo.

P - Exactamente. Figura en todos los libros de física de posguerra.

B - ¿De esta guerra que se avecina? (Se refería a la del 14, pero nosotros hablábamos de la del 38)

P - Si,... en realidad habrá otra después..., Bueno,...debemos irnos. Hasta la vista, profesor, y gracias por su atención. Revelaremos esta charla cuando no perjudique ni altere la historia futura.



VACACIONES EN MURUROA

No quisimos entrar en detalles para no preocupar al sabio, al que le esperaba una dura prueba durante la segunda guerra mundial.

Nos dirigimos a la Agencia de Viajes espacio-temporal de Copenhague. Pedimos un boleto para Buenos Aires, 1996. Una promotora trató de vendernos Muroroa 1995, pero preferimos llegar aquí y escribir ésta página.

-o-o-o-

La mecánica ondulatoria de De Broglie

Vimos que un fotón puede considerarse como una partícula de masa **m** tal que su energía total vale **h.n**

Podemos poner así que: **m.c^2=h.n**

Pero como la frecuencia es la velocidad c dividida la longitud de onda λ, también podemos poner la anterior como m.c^2=h.c/λ y también **m.c=h/l**

Pero **m.c** es la cantidad de movimiento del fotón (masa por velocidad, en este caso la de la luz c). Los físicos llaman **p** a la cantidad de movimiento de una partícula. Animémonos a poner, a pesar de ser el fotón un tren de ondas **p=h/l**, como si fuera una partícula.

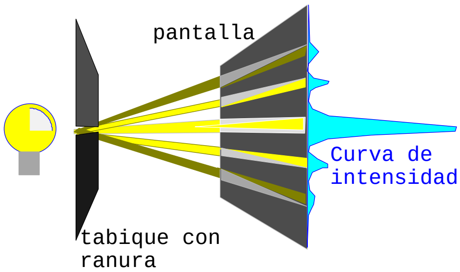
Si el fotón es un tren de ondas y tiene características de partícula, ¿por qué no considerar a la partícula material con velocidad v como un tren de ondas y aplicarle la consabida **m.v=h/l**? Para ese caso existe entonces una onda de longitud l asociada a la materia en movimiento. ¿Onda de qué? Onda de materia.

¿Y qué es una onda de materia?. No sabemos bien qué es, pero alguna experiencia de difracción debe darnos la pista.

¡Qué locura! ¿Quién dijo éso?

Fue el físico francés Louis Victor De Broglie, (1892-1987), en 1924. Le dieron el premio Nobel cuando se pudo demostrar que un electrón, considerado hasta ese momento como una típica partícula con carga, se difractaba cuando pasaba por un enrejado muy fino. Al revés del fotón, onda con alma de partícula, el electrón tenía aspecto de partícula y alma de onda.

¿Qué es la difracción? Es la desviación de un rayo a ambos lados al pasar a través de una ranura u orificio estrecho, de dimensiones comparables a la longitud de onda de la radiación. Es privativo de las ondas ya que se explica por la interferencia entre las partes de una pequeña parte de una onda limitada por la ranura. No puede difractarse una partícula sólida salvo que tenga carácter ondulatorio.



Una bola de billar que pasa por un agujero puede desviarse hacia un lado u otro si choca contra los bordes, pero no puede salir hacia ambos lados a la vez. En cambio una onda sí, sale de la ranura dando una figura de franjas a ambos lados de la franja brillante central.

¿Por qué no se nota la difracción de una bola de billar? Apliquemos la fórmula de De Broglie. La bola pesa 0,1 Kg y pasa por un tabique a 1 m/s. Tiene una longitud de onda asociada igual a:

λ = h/m/v = 6,63.10^{-34} Js/0,1Kg/1m/s = 6,6.10^{-33} m

¡No hay tabique tan estrecho para difractar a esta bola!

Probemos con un electrón de carga q y masa m acelerado con un potencial de 1 volt

Su energía cinética será igual al trabajo eléctrico, o sea:

V.q = 1/2.m.v^2, de donde v = (2.V.q/m)$^{1/2}$ = (2.1V.1,6.10^{-19}C/9.10^{-31}Kg)$^{1/2}$ =596628 m/s

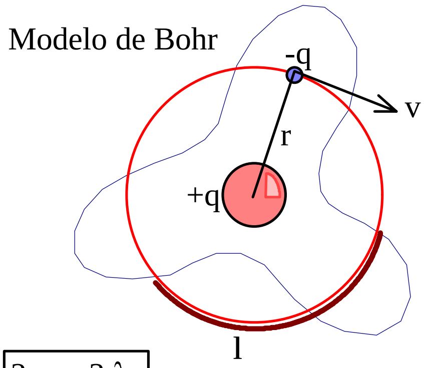
p = m.v = 6x10^{-25} Kg.m/s

λ = 6,63.10^{-34} Js/6x10^{-25} Kg.m/s = 4x10^{-9}m

Esto tiene más color aunque todavía es difícil imaginarse una rendija del orden de $4x10^{-9}$ m (unos 40 Å). Sin embargo las tenemos. La Naturaleza nos proporciona redes con una trama incluso menor: los cristales, arreglos de átomos colocados regularmente que constituyen un enrejado natural con separaciones del orden del Å ($1Å=10^{-10}m$).

Davisson y Germer hicieron el experimento: difractaron electrones con un cristal. Un solo electrón produce difracción, demostrando que en cierto sentido es como un fotón, partícula y tren de ondas a la vez.

La condición de cuantización de Bohr traducida al castellano



$\boxed{2.\pi.r=3.\lambda}$

Vimos que Bohr dedujo en su modelo atómico que **m.v.r = n.h/2/p**

Esto se puede poner así: **2.p.r = n.h/(m.v)**

$2\pi r$ es la longitud de la órbita del electrón

n.h/(mv) es igual a n.λ , o sea un número n (entero) de longitudes de ondas materiales asociadas al electrón en giro.

La condición de Bohr quiere decir, según el lenguaje de De Broglie, que en un átomo los electrones circulan en órbitas cuya longitud es un número entero de longitudes de la onda material asociada a la partícula en movimiento.

Cuando una onda se confina a un espacio que contiene un número entero de ondas se forma una "onda estacionaria". Es decir que las ondas de materia permitidas o estables en el átomo son estacionarias.

La velocidad de las ondas de materia

Si seguimos trabajando formalmente con las ondas de materia, podemos poner que $\lambda_\mu=c/m/v=V/f$, donde **V** es la velocidad de las ondas materiales de frecuencia $f=V/\lambda_\mu$

Haciendo un paralelismo de la relación $E = h.\nu = m.c^2$ (válida para fotones) podríamos poner para electrones de masa m_e la equivalente

$E_\mu = h.f = m_e.c^2 = h.V/\lambda_\mu$

Pero como $h/\lambda_\mu = p = m_e v$, resulta $c^2=V.v$

La velocidad de la onda material asociada al electrón en movimiento acelerado por un potencial eléctrico de 1V (del ejemplo anterior) vale

$V = c^2/v = 9x10^{16} (m^2/s^2)/596628(m/s) = 1,5x10^{11}$ m/s

muy superior a la velocidad de la luz $c=3x10^8$ m/s

-o-o-o-

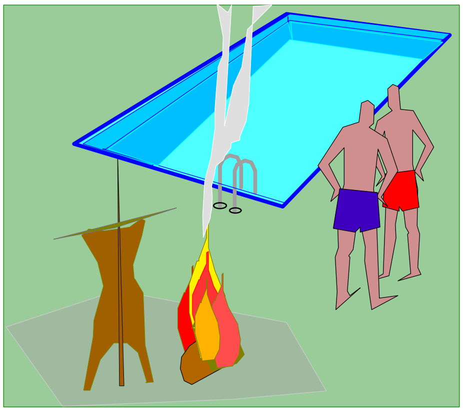
Un asado de trabajo

Corría el verano de 1972. Después de comer un buen asado bien regado en una quinta de La Lonja, el dueño de casa, amigo y mentor en temas varios, todavía fue capaz de darnos una disertación sobre ondas y materia:

F.R. (anfitrión) - Se me ocurrió el otro día algo relacionado con la tremenda velocidad que pueden llegar a tener las ondas materiales.

I.V.B.S. (interlocutor válido bastante sobrio) - ¿Qué significado pueden darse a las ondas materiales?

F.R. - A Don Albert Einstein se le ocurrió la siguiente analogía electromagnética. Un campo de radiación electromagnética tiene una densidad de energía proporcional al cuadrado de la amplitud del campo magnético o del campo eléctrico (el famoso “vector de Poynting”). Si pasamos al modelo cuántico de gas de fotones, esa densidad de energía se convierte en densidad fotónica. Ahora bien, si la amplitud del campo eléctrico representa la densidad fotónica, el cuadrado de la amplitud de una onda de materia ¿qué representará?



Silencio. Nadie contesta. Trinar de pájaros. También ronquidos lejanos.

F.R - Veo que la digestión los embota, amigos. El cuadrado de la amplitud de la onda material representa la densidad de materia distribuida de la partícula en movimiento. Einstein hablaba de la “probabilidad de encontrar a un fotón en el caso de la radiación, o la probabilidad de encontrar al electrón, o a la partícula”. Prefiero imaginar la materia en movimiento como “borrosa” o “difusa”.

I.V.B.S. - O “distribuida” en una onda. Una distribución es en definitiva una función de probabilidad. -(Le costó pronunciarlo)-.

F.R. - Está bien. Pero sigamos con mi propuesta para la velocidad de las ondas de materia. Creo que esa onda que representa la partícula en movimiento debe tener mayor velocidad que la luz.

I.V.B.S. - ¿Por qué “debe”?

F.R. - Para enterar a la rendija que se aproxima la partícula que debe difractar. La interacción entre la rendija y la partícula debe estar avisada de antemano para que la difracción se produzca.

I.V.B.S. - Un momento, F. Me parece que olvidas que si la partícula es un fotón, onda y partícula tienen la misma velocidad. Entonces no hay aviso previo y sin embargo hay difracción.

F.R. - Si, tenés razón, en realidad no hay aviso en el caso del fotón. La rendija no lo necesita. Los fotones tienen todos la misma velocidad. En cambio las partículas pueden venir a cualquier velocidad.

I.V.B.S. - Si vienen despacio se difractan mucho porque tienen longitud de onda grande. ¿O porque la rendija tiene tiempo de preparar “la gran difracción”?

F.R. - Pudiera ser así. En cambio, si vienen ligero, la rendija no tiene mucho tiempo: nos acercamos así a un calibre “pasa, no pasa”.

I.S.2 (Invitado sobrio N°2) - Me parece que todo esto tiene que ver con el principio de incertidumbre. El que dice que cuanto más aseguremos la velocidad de una partícula, menos certeza tendremos de su posición.

F.R. - Veo que nos estamos despejando. Es el café que preparó mi esposa, que sin embargo no te ha hecho aún un efecto completo.

El principio de incertidumbre o de indeterminación, de Heisenberg, no tiene que ver exactamente con lo dicho.

El alemán Werner Heisenberg (1901/76) planteó que existe una limitación natural cuando se trata de medir simultáneamente posición y velocidad de una partícula. Por ejemplo las coordenadas de una molécula de un gas. Proviene de dos causas:

- Que hay una interacción entre observador y objeto observado.
- Que la imagen de difracción de un punto es una mancha con anillos concéntricos.

La acción de observar para determinar la posición de una partícula puntual supone iluminar a ésta. Luz que cae sobre ella. Fotones que impactan y se desvían para formar una imagen, pero que al mismo tiempo modifican la cantidad de movimiento de la partícula sobre todo si ésta es pequeña.

Por otra parte la posición anotada tiene un error de definición óptica: una partícula da como resultado no una imagen puntual sino una mancha de difracción. ¿En qué lugar de la mancha está la partícula?. No podemos precisarlo.

Resumiendo: mirar no es gratis. Altera el sistema observado. Mientras mejor miramos, con longitudes de onda menores (rayos X o gamma), más duro le pegamos a la partícula. Y ésta sale disparada después de la observación con otra velocidad diferente a la que tenía antes.

Por eso no es lo mismo mirar primero y luego medir la velocidad, que medir primero y mirar después. El orden de las observaciones cambia las cosas. Heisenberg diría que los operadores “ver” y “medir” no son conmutables, aludiendo a las propiedades de las matrices matemáticas que los representan.

I.V.B.S. - Nunca alguien me había explicado las cosas así. ¡Sos un genio F.R.! - Los demás asintieron, algunos sinceramente, otros por compromiso.

F.R. - Gracias, amigos míos. Pero los genios son De Broglie, Heisenberg, Schrödinger y Dirac. Otro genio es Julio Rey Pastor, que explica la faz matemática del asunto en su “Análisis Matemático”. Recuerdo el párrafo en el tomo III: “Espacios de Hilbert y mecánica cuántica”. Recomiendo la lectura de esta “sinfonía”.

Una de las hijas de F.R. que ayudaba a levantar la mesa dijo: - ¿Se van a quedar hablando de física toda la tarde?. ¿No van a aprovechar el sol y el agua?

- ¡Tiene razón! ¡Vamos a la pileta, a la pileta!... - gritaron todos.

Esa noche leí el Tratado de Análisis Matemático de Rey Pastor, Pi Calleja y Trejo, tomo III, página 89. Una verdadera obra maestra que transcribo textualmente a continuación:

Separata del tratado de Análisis Matemático , de Rey Pastor, Pi Calleja y Trejo

El espacio de Hilbert en la mecánica cuántica:

Nos proponemos señalar (de modo, por fuerza, informal para no alejarnos mucho del tema de esta obra) como la necesidades de la Ciencia natural encuentran un marco adecuado en el espacio de Hilbert, y dan motivación concreta al estudio, que luego haremos, de problemas lineales, ya sea algebraicos o con operadores diferenciales o integrales.

a) Panorama histórico.- a_1) La Física matemática del siglo XX interpreta el Universo inorgánico construyendo estructuras abstractas con entes arbitrarios x_i relacionados entre sí por operaciones convencionales O_j, sin pretensiones ontológicas de realidad ni siquiera de modelo intuitivo construido a semejanza con las entidades del mundo externo, cuya naturaleza íntima renunciamos a conocer; basta que haya correspondencia entre ese armazón simbólico, inteligible pero no intuíble, y los entes físicos ξ_i; y que a cada operación Ω_j entre estos corresponda una operación O_j entre los x_i. Esta coordinación paralela entre simbolismo y fenómenos físicos es un isomorfismo.

Este viraje de la Física en el sentido pragmático y agnóstico ha sido realizado en el presente siglo, por la fuerza de las paradojas irresolubles que plantearon a las viejas teorías algunos experimentos rotundos. La luz, es decir la radiación, es emisión de corpúsculos, decía la desechada teoría newtoniana, pero bastó la flagrante contradicción surgida ante el fenómeno de las interferencias, rebelde a la teoría emisionista, para concluir que la luz no es lluvia de corpúsculos; y ante la necesidad de otra hipótesis que llenara el vacío de aquella, declarada absurda, y con el convencimiento de la unidad funcional del Universo, se recurrió, copiando el modelo de la acústica, a la hipótesis ondulatoria; pero faltando aquí el medio material que vibrase, necesitándose algún sujeto para el verbo vibrar, se inventó el éter, un nuevo éter, epígono de la larga dinastía de éteres ideados desde Heráclito a Descartes. Poco importaba que el novísimo éter, al igual que sus antepasados, fuese contradictorio consigo mismo; pues con tal artificio se lograba explicar satisfactoriamente las interferencias y los fenómenos ópticos acontecían como si la luz fuese ondulación. Pero los éxitos logrados en la segunda mitad del siglo XIX fueron tantos y tales que los físicos se fueron acostumbrando al éter hasta acabar creyendo en él; y desde su ínfimo papel de mal menor ascendió esta entelequia a la suprema categoría de realidad física. Los físicos finiseculares no solo hablaban con aplomo del "viento de éter" cuya velocidad intentó medir Michelson, sino que creían ciegamente en él como realidad física y descubrimiento definitivo; y afirmaban con rotundidad que la luz en toda su amplísima gama, es decir, la radiación, es vibración del éter.

En esa era eufórica y victoriosa de la teoría ondulatoria, ¿quién habría osado pronunciar la nefanda frase "emisión de corpúsculos"?, y sin embargo algunos experimentos decisivos obligaron a resucitarla, y Einstein rebautizó en 1905 a los corpúsculos newtonianos con el nuevo nombre de "fotones". Durante tres décadas los textos de Física ofrecían el curiosos espectáculo de presentar en algunas páginas a la luz como ondulaciones y en otras como emisiones, renunciando así a la vieja pretensión ontológica de discutir lo que la luz es, para conformarse con ver cómo se comporta. Pero la hábil escapatoria sólo podía satisfacer a los escépticos, para quiénes la ciencia es endeble armazón que en cada siglo se derrumba una o más veces al soplo de un experimento adverso, para volver a empezar un nuevo tinglado, que en nada se parezca al anterior.

a_2) La crisis de la Física ha sido superada ya gracias a la nueva Mecánica esbozada por De Broglie y elaborada con inusitada rapidez en los años 1925 y 1926 por Schrödinger-Heisenberg-Dirac; y la pasmosa coincidencia con que se llega a los mismos resultados por tres vías totalmente diversas, reflejo de las armonías matemáticas descubiertas en el espacio de Hilbert, han conducido a la Física a una nueva era de prosperidad y optimismo, afirmándose más cada día estas convicciones:

1ª) La continuidad aparente del mundo físico, en que se basó la fructífera aplicación del cálculo infinitesimal durante los siglos XVIII y XIX es sólo una resultante de innumerables procesos individuales, imposibles de percibir y analizar por separado. No sólo la materia es corpuscular, como adivinó Demócrito, sino también la energía, como entrevió Newton y sistematizó Planck;

2ª) En la nueva Física conserva su eficacia el Cálculo clásico, pero sus funciones continuas representan densidades de enjambres corpusculares, o probabilidades de distribución en el espacio; las leyes dinámicas newtonianas resultan como promedios, afirmándose tras esta conmoción el valor eterno de la mecánica de Newton, como se fortaleció con el embate de la Relatividad;

3ª) La discontinuidad de los posibles niveles de energía encuentra su expresión en ciertas sucesiones discontinuas de números surgidas espontáneamente en muchos capítulos de la matemática; son los autovalores (ver b), a cada uno de los cuales corresponde una cierta magnitud matemática de carácter vectorial que puede ser: una sucesión de números, una matriz infinita, una función de una o más variables, etc.;

a_3) De esta diversidad de algoritmos surge la variedad de Mecánicas cuánticas; y el isomorfismo entre ellos, que expresa su identidad de esencia bajo los ropajes de simbolismos muy distintos, surge la equivalencia de esas diversas mecánicas. El quid común a diversas construcciones organizadas con símbolos, es decir el sustrato formal puramente algebraico que la moderna Álgebra abstracta se esfuerza en desentrañar como fundamento común a las más dispares teorías matemáticas, parece ser lo único firme e inconmovible en nuestra representación conceptual del mundo. Eso es todo lo que podemos conocer del Universo, y a eso se reduce, para la Física, la realidad externa.

b) La esencia de las mecánicas cuánticas.- Por aventurado sea el empleo de extraer la esencia común a esas complicadas teorías, antes de su conocimiento detenido,, la forzosa vaguedad de estas consideraciones puede servir como incentivo para su estudio en tratados especiales (ver por ejemplo Von Neumann citado en nota IV,1 y J.Rey Pastor citado en nota IV,8). Aquí sólo nos proponemos citar la naturaleza de los métodos e instrumentos matemáticos requeridos.

b_1) La Física estudia casi exclusivamente procesos aditivos o lineales homogéneos, en los que vale el principio de superposición, que puede expresarse así:

$L[u+v]=L[u]+L[v]$, $L[ku]=kL[u]$

Esa linealidad puede expresarse por ecuaciones algebraicas o diferenciales totales o parciales, o bien por ecuaciones integrales, pero en todas ellas aparece un hecho común: el problema línea homogéneo es en general imposible, es decir sólamente admite la solución trivial idénticamente nula que carece de interés. Ahora bien, si en el problema figura una parámetro numérico λ para ciertos valores especiales de éste $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3...$, llamados autovalores o valores propios, el problema imposible se hace posible, y cada uno determina una solución llamada autofunción, o más general autovector, para abarcar así números complejos, sucesiones y funciones.

Ya hemos dicho que la Física cuántica no admite la variación continua de la energía; en el átomo y en cualquier sistema sólo son posible ciertos niveles de energía y sólo para ellos puede satisfacerse la ecuación que determina ese estado estacionario; pero, ¿cómo expresar mediante una sola función el reparto en el espacio de energía de un sistema, que puede ser complicado?. En la mecánica ondulatoria creada por Schrödinger se adopta como expresión de ese estado una función de densidad o probabilidad $\Psi(x,y,z)$ que multiplicada por la energía total E expresa la cantidad de energía $E\Psi$ en las diversas regiones del espacio; ese producto $E\Psi$ es un miembro de la ecuación. Por otra parte en cada sistema hay una cierta peculiar distribución de la energía cinética, caracterizada por un operador diferencial, que sumada a la energía potencial $V(x,y,z)$ conocida, viene expresada por un operador diferencial, el llamado operador H de Hamilton, característico de ese sistema.. tenemos así la ecuación de Schrödinger, que en el caso de k parámetros es:

$$H\Psi(q_1,...,q_k)=E\Psi(q_1,...,q_k)$$

cuyos autovalores E_1, $E_2,...$, son los niveles posibles de energía y las correspondientes autofunciones $\Psi_1,\Psi_2,...$, definen los estados estacionarios del sistema.

Por ejemplo, en el caso de un sólo corpúsculo de masa m, las coordenadas q_i son x,y,z ; y si $V(x,y,z)$ es el potencial (en el caso gravitatorio sería $V=mgz$) el operador H del sistema es:

$$H = 1/2/m(\partial^2/\partial x^2+\partial^2/\partial y^2+\partial^2/\partial z^2)+V(x,y,z) = 1/2\Delta + V$$

Lo único que por ahora nos interesa es que en todo caso cada autofunción $\mathbf{E_n}$ determina una solución $\Psi_n(q_1,q_2,...,q_n)$ que define el correspondiente estado estacionario y que esas funciones Ψ son vectores de un espacio de Hilbert por ser de cuadrado integrable.

b_2) En la Mecánica matricial el problema lineal es algebraico; la resolución de un sistema de infinitas ecuaciones con infinitas incógnitas:

$$\Sigma h_{rs}x_s = Ex_r \quad (r=1,2...)$$

del mismo tipo como se presenta en Geometría el cálculo de los ejes de una cuádrica. También aquí son los autovalores E_n los niveles posibles de energía, los únicos que hacen compatibles las ecuaciones y cada uno En determina un vector $\{x_{1n}, x_{2n}, x_{3n},...,\}$ que por sí solo no tiene interés físico, pero alineadas todas estas sucesiones como columnas, componen una matriz X que transforma la {Hrs} en una matriz diagonal D formada por la sucesión E1, E2, E3,..., en su diagonal principal, siendo nulos todos los demás elementos.

Hay, como se ve, una profunda diferencia entre ambos problemas lineales, en el planteamiento de la Mecánica ondulatoria la solución dada por En, es decir la autofunción Ψ es ya la metafísica, pues $|\Psi|^2$ es la probabilidad buscada en todo punto del espacio; pero en la Mecánica matricial de Heisenberg la matriz formada por las infinitas soluciones es nuevo instrumento algebraico para llegar a la matriz diagonal D que simboliza la distribución de la energía en el espacio.

b_3) Precisamente esa diversidad de método y significado hace brillar más el éxito de ambas teorías al arribar a resultados concordantes, y el de Dirac y Schrödinger al unificarlas en un sólo cuerpo de doctrina.

La unificación de Dirac consiste en pasar del operador diferencial H a un operador integral y la ecuación $H\Psi(q_1,...,q_k)=E\Psi(q_1,...,q_k)$ se reduce a una ecuación integral $\int h\phi\, dV=E\phi$ cuyo paralelismo con la anterior se hace evidente; pero este tránsito lo realiza por la magia de cierta función $\delta(q)$, que no es función, y se somete a operaciones que sólo el éxito ulterior justifica o al menos disculpa.

Mucho más rigurosa es la identificación hecha por Schródinger al poner de manifiesto el paralelismo entre las sucesiones que componen el espacio E_∞ y las funciones de cualquier número de variables cuyo cuadrado es integrable. Ese isomorfismo no se apoya en la integral (L) como el teorema de Riesz Fischer (nota III) por la sencilla razón de que aquí se consideran solamente funciones derivables; y sería pueril enriquecer el espacio (R^2) con funciones tan discontinuas que no son integrables para formar así el espacio más amplio (L^2) cuando en verdad hay que restringirlo excluyendo de (R^2) no solamente todas las funciones discontinuas, sino también las continuas no derivables; es poda y no injerto lo que aquí necesitamos.

Es, pues, un isomorfismo menos perfecto que el demostrado por Riesz-Fischer, pero en cambio mucho más amplio y profundo cuando se extiende a los operadores diferenciales y a las matrices, algoritmos tan heterogéneos que no se habría sospechado tan perfecta correlación, la cual explica la equipotencia de las dos mecánicas ondulatoria y matricial.

-o-o-o-

Una consideración necesaria para el lector, a quién queremos enseñar antes que deslumbrar:

¿Para qué estos artículos difíciles, que parecen escritos por superhombres en esta obra de nivel secundario?

Para sacarles el misterio y la magia que aparentan cuando se nos presentan como obra terminada. Es en cambio su génesis lo verdaderamente interesante.

Veremos que todas esas fórmulas tienen un origen humilde. Estudios sobre temas terrenos como el del rasgueo de una guitarra, el de un hierro calentado en la fragua , la presión de un taco de mujer sobre el parquet. Teorías que no nacieron perfectas, sin una comprensión del mundo casi divina, como algunos pretenden hacer creer. Antes del concierto impecable que Rey Pastor nos acaba de tocar, hubo ensayos con notas chingadas y tenores afónicos. Del conocimiento de esos pasos inseguros sacaremos el mayor provecho .

Quedé impresionado por la elegancia y concisión del artículo del “Rey Pastor”. Me pareció también que convendría hacerlo un poco menos apretado y ampliar algunos puntos, aún para alumnos de tercer año de ingeniería, a los que yo daba clase por entonces. A continuación presento ese apunte que proporcioné al Centro de Estudiantes de Ingeniería de la UCA en 1992, inspirado en el artículo de mentas y en algunos otros textos. Hoy, en 1996, considero que es demasiado sintético y no llega al fonde de la cuestión. Pero, en fin... Ahí va:

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE MECÁNICA CUÁNTICA

Transcripción de un apunte de Física III - UCA - Ingeniería - 1992

Discontinuidad de la materia y la energía

Cuando estudiamos los fenómenos físicos en una escala suficientemente pequeña, vemos que la materia es discontinua, como lo intuyó Demócrito en la antigüedad y como quedara sistematizado en la teoría atómica moderna del siglo pasado. Gracias a los trabajos de Planck sobre radiación térmica en 1900 , también la luz y en general la energía radiante se nos reveló como formada por paquetes indivisibles o "cuántos", una versión más moderna de los olvidados corpúsculos luminosos de Newton.

Partículas y Ondas

La experiencia demuestra que materia y radiación interaccionan con las mismas leyes que rigen para el choque entre partículas, o sea la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento del sistema antes y después de la interacción. Esta y otras razones indujeron a considerar a los cuántos de energía radiante como verdaderas partículas materiales. Junto con el electrón y el protón pasaron a ser una nueva partícula elemental llamada fotón. Los fotones de frecuencia ν llevan una energía discreta $h.\nu$ siendo h una constante universal bautizada por Planck como "cuánto de acción" . El cuanto de acción (la acción tiene las mismas unidades que la cantidad de movimiento o impulso) vale $h=6.62377 x 10^{-34}$Js y es una magnitud omnipresente en todos los desarrollos de mecánica cuántica.

Tanto el fotón "es" una partícula, que Bose y Einstein desarrollaron una teoría estadística que estudia los gases de fotones con un modelo similar a la usada para los "gases" de electrones y los "verdaderos" gases ideales de moléculas.

Pero los fotones tienen sin duda características ondulatorias: son pura radiación electromagnética, son paquetes de ondas, que interfieren y se difractan. Son ondas y también partículas.

Cabe preguntarse entonces si no será cierto la proposición generalizada: ¿No será que todas las partículas materiales tienen algo de onda?

Ondas materiales

Fue De Broglie en 1924 quién propuso que cualquier partícula en movimiento, no sólo el fotón, debía tener características de onda.

Para ello razonó con una analogía formal entre partícula a velocidad v y fotón a velocidad c (c es la velocidad de la luz)

En efecto, ya que para el fotón se cumple que su cantidad de movimiento es $\mathbf{p=m.c}$ y que su energía vale $\mathbf{E=mc^2}$, y que esta energía vale también $\mathbf{h.n}$ (con su longitud de onda $\mathbf{l}$ de manera que $\mathbf{n=c/l}$), resulta que:

$$l = c/n = h.c/m/c^2 = h/p$$

De Broglie extendió la fórmula anterior a una partícula cualquiera de masa $\mathbf{m_p}$ y velocidad $\mathbf{v}$, con lo cual le asociaba una longitud de onda material l_m :

$$l_m = h/p_m = h/m_m/v$$

Siendo $\mathbf{E_m=m_pc^2}$ la energía total de la partícula y siguiendo con la analogía , así como la velocidad de las ondas fotónicas vale $\mathbf{c=E/p}$ resulta que la velocidad de las ondas materiales valdrá:

$$V = E_m/p_m = E_m/(m_p.v) = c^2/v$$

Esta velocidad V del tren de ondas asociado a una partícula de velocidad v es mayor que la de la luz ya que $v<c$. Es lo que en la física de las ondas se llama "velocidad de fase" de un tren de ondas, para distinguirla de la "velocidad del grupo de ondas" que es la de la perturbación en su conjunto, y que en este esquema corresponde a la de la partícula v .

Si la hipótesis de De Broglie se cumplía, cabría esperar que la materia se difractase, como los fotones. La comprobación experimental de la difracción de partículas llegó un poco después que Erwin Scrödinger dedujera la ecuación de la amplitud de las ondas de De Broglie, ondas materiales en las que había creído pero nunca había visto.

En efecto, en el año 1925, año de la ecuación de Schrödinger, que marca una etapa importante en el desarrollo de la mecánica cuántica, Davisson y Germer comprobaron experimentalmente que un haz de electrones en movimiento daban una figura de interferencia cuando pasaba por una red cristalina, de la misma manera que lo hace un haz de rayos X en la experiencia de Bragg.

Un fotón es un tren de ondas y basta uno sólo para dar una figura de difracción. ¿Qué pasará con un sólo electrón al pasar por una rendija?

Se llegó a realizar poco después la refinada experiencia con un sólo electrón, en vez de un haz, y el resultado probó que un sólo electrón se desdobla en una figura de difracción, igual que el fotón.

Esto nos aleja de la imagen clásica de un chorro de partículas que por efecto de los choques contra los bordes de una rendija pudieran desviarse algunas hacia un lado y otras hacia el otro. En cambio está de acuerdo con la hipótesis de De Broglie : cada partícula material en movimiento se comporta como un tren de ondas.

Principio de incertidumbre

Otro gran aporte a las nuevas teorías lo dio Werner Heisenberg cuando postuló por la misma época el principio de incertidumbre o indeterminación. Éste establece que la interferencia entre mediciones de algunos parámetros simultáneamente, por ejemplo posición y velocidad de una partícula en un instante dado, crean una imprecisión en el conjunto de las dos mediciones. Esta imprecisión o indeterminación es inherente a la mencionada condición de simultaneidad de las dos mediciones, y no tiene nada que ver con la introducida por los procedimientos e instrumentos de medida. El principio de indeterminación es otra manera de tener en cuenta que la materia en movimiento tiene carácter ondulatorio, que una partícula que se mueve tiene necesariamente una imagen "borrosa", que se la ve como una mancha de difracción en vez de un punto.

Necesidad de un nuevo modelo

A estos cuántos, mezcla de onda y partícula, no pueden en general aplicárseles las mismas leyes derivadas de la experiencia macroscópica sobre sistemas "grandes" formados por un gran número de ellos. Así las leyes de la mecánica de Newton y de Einstein pasan a ser ahora leyes de carácter estadístico de un enjambre de partículas sobre las que individualmente deben aplicarse otras leyes, cuyo conjunto se ha dado en llamar **mecánica cuántica**.

MODELOS MATEMÁTICOS DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Los fenómenos físicos cuánticos se representan difícilmente con imágenes tradicionales tales como partículas y ondas separadamente. Las imágenes clásicas que sugieren los experimentos son equívocas: ondas que si se miran de una forma se manifiestan como partículas y viceversa, experiencias en las que la observación pura las afecta, acontecimientos que ocurren al azar, etc.

Por ello los físicos actuales han renunciado cada vez más a conocer qué es la realidad para tratar en cambio de explicar cómo se comportan los sistemas estudiados. Para ello recurren a modelos abstractos donde se estudian entes matemáticos relacionados por operaciones, que se corresponden con entes y operaciones en el mundo físico. Se dice que existe entonces un isomorfismo entre modelo matemático y realidad experimental.

Afortunadamente vino en ayuda de la comprensión de la física cuántica el descubrimiento de que existe un isomorfismo entre la realidad observable del estado de un sistema a escala microscópica y ciertos sistemas de ecuaciones lineales homogéneas en los que figuran determinado tipo de funciones y operadores matemáticos.

Así las ondas materiales están representadas por familias de funciones ortogonales, de las que son ejemplo típico las series de Fourier, y las energías posibles del sistema por ciertos valores que están relacionados con aquéllas a través de ecuaciones de operadores.

Operadores

Puede definirse sencillamente a un operador como a toda instrucción que aplicada sobre una función la cambia en otra manteniendo la misma información.

La aplicación de un operador en el modelo matemático corresponde en la realidad a la operación experimental de medir u observar. Así la imagen matemática de medir un momento angular corresponde a la de aplicar un operador momento sobre una función que define el sistema, la de definir los niveles posibles de energía corresponde a aplicar el operador de Hamilton a la función de onda, etc.

Que la simple observación implique una acción sobre el sistema no nos debe llamar la atención, ya que por ejemplo "ver" una partícula supone la interacción de la misma con un fotón. El resultado de haber observado es fotón y partícula desviados por un choque.

El principio de indeterminación está representado matemáticamente por dos operadores que no gozan de la propiedad conmutativa, es decir que no dan el mismo resultado cuando se aplican sucesivamente sobre una misma función cambiando el orden.

Desde el punto de vista matemático, un operador puede ser de carácter diferencial, integral, matricial, etc. Estas diferentes formas dan origen a otras tantas formas de plantear matemáticamente los fenómenos físicos cuánticos: mediante ecuaciones diferenciales, integrales, matriciales, etc.

La solución de estas ecuaciones fuera de la trivial (que asigna valor nulo a las variables, y que por lo tanto no aporta un resultado interesante) se puede alcanzar sólamente cuando las funciones a la que se aplica el operador pertenecen a un grupo infinito ortogonal de cuadrado integrable, y cuando en la ecuación figura un parámetro que toma un valor determinado para cada una de las funciones posibles. A aquéllas se las llama autofunciones correspondientes al operador en cuestión, y a los valores del parámetro se los llama autovalores o valores propios correspondientes a las autofunciones anteriores.

El método diferencial fue desarrollado por Schrödinger, el matricial por Heisenberg y el integral por P.Dirac. Por ser absolutamente equivalentes se pueden usar en forma combinada en la solución de un mismo problema, de la misma forma que en un problema de geometría a veces se mezclan los procedimientos vectoriales con los analíticos.

Ecuación de Schrödinger

Se admite que el estado estacionario de equilibrio de un sistema de n dimensiones se alcanza cuando para una función $ø(x_1,x_2,..x_n)$ se cumple la ecuación de una onda estacionaria:

$$\mathbf{H\ ø(x_1,x_2,..x_n) = E\ ø(x_1,x_2,..x_n)}$$

donde H es el operador diferencial de Hamilton o Hamiltoniano característico del sistema en cuestión. Para el caso particular de una partícula de masa m de coordenadas x_1, x_2, x_3 es:

$H = 1/2/m\ \nabla^2 + V$, con $\nabla^2=\partial^2/\partial x_1{}^2+\partial^2/\partial x_2{}^2+\partial^2/\partial x_3{}^2$ (Operador de Laplace)

E = energía total del sistema

V = energía potencial del sistema = $m.g.x_3$

La solución a esta ecuación (fuera de la trivial ø=0) se obtiene para una sucesión de infinitos valores E1, E2, E3, que son los niveles de energía posibles correspondientes a la sucesión de infinitas autofunciones ortogonales $ø_1,ø_2,ø_3$....., que definen los estados estacionarios del sistema.

El significado físico de ø , que es matemáticamente la amplitud de la onda material, puede asimilarse al del campo eléctrico o magnético en una onda electromagnética: Como se sabe el producto de ambos E*H es una medida de la potencia de la onda, y en la teoría fotónica de Einstein es una medida de la densidad de fotones en el lugar considerado. Esta densidad sería proporcional a la probabilidad de hallar un fotón en esa región del espacio. Por eso se interpreta al cuadrado de la función de onda $ø(x_1,x_2,..x_n)$ como probabilidad de encontrar una partícula en el lugar de las coordenadas $x_1,x_2,..x_n$

Método matricial de Heisenberg y su interpretación geométrica

Para Heisenberg el modelo lineal es algebraico. Plantea un sistema de infinitas ecuaciones con infinitas incógnitas del tipo:

$S_i\ (a_{ij}.u_i) = E.u_j$

Aquí también los autovalores E_n son los posibles niveles de energía que hacen compatibles las ecuaciones, determinando cada uno de ellos un vector u_{1n}, u_{2n}, u_{3n},...

El desarrollo de ese sistema en forma matricial es idéntico al que se plantea en geometría para calcular los ejes de una cuádrica con centro, por ejemplo un elipsoide (n=3)

Así desde el punto de vista geométrico un sistema físico n dimensional objeto de observaciones tiene asociado una superficie de grado n (o cuádrica de grado n) cuya forma depende de la magnitud que se trata de medir: posición, velocidad, momento, energía, etc.

La operación de encontrar las direcciones de los n ejes principales de esa cuádrica, ejes ortogonales bajo los cuales su ecuación toma la forma más sencilla, supone la resolución de la ecuación de Lagrange o ecuación secular (por su aplicación al problema astronómico de las perturbaciones seculares).

Ella nos da un conjunto de n valores posibles para un cierto parámetro (autovalores). Los autovalores permiten encontrar las n direcciones de los versores correspondientes a los ejes principales ortogonales. Cualquier vector paralelo a ellos es un autovector, y representa una posible distribución de valores para la magnitud observada.

Para fijar ideas supongamos un problema en tres dimensiones x,y,z

La ecuación general de la cuádrica con centro correspondiente a la observación efectuada será:

$$a_{11}\ x^2 + a_{22}\ y^2 + a_{33}\ z^2 + 2a_{12}\ xy + 2a_{13}\ xz + 2a_{23}\ yz \pm 1 = 0$$

Para hallar los autovalores E se resuelve el sistema para j=1...n (n=3)

$S_i\ (a_{ij}.u_i) = E.u_j$, donde u_i son las componentes del versor buscado.

Para que este sistema tenga soluciones (fuera de $u_i = 0$) , debe ser nulo el siguiente determinante (ecuación de Lagrange o ecuación secular):

$$\begin{vmatrix} a_{11}-E & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22}-E & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33}-E \end{vmatrix} = 0$$

Hay que aclarar que la matriz para una cuádrica es simétrica, esto es $a_{i,j} = a_{j,i}$. Se demuestra que las raíces E son entonces reales.

Resulta útil expresar la anterior haciendo intervenir a cantidades J conocidos como invariantes lineal cuadrático y cúbico

$J_1 = a_{11} + a_{22} + a_{33}$

$J_2 = a_{11}\, a_{22} + a_{22}\, a_{33} + a_{33}\, a_{11} - a_{12}^2 - a_{23}^2 - a_{31}^2$

J_3 = determinante $[a_{ik}]$

tomando la forma:

$-E^3 + J_1.E^2 - J_2.E + J_3 = 0$

De esta ecuación se obtienen las raíces E_1 , E_2 , E_3 . Ellas son los autovalores, que tienen carácter de invariante, es decir que mantienen su valor para la misma cuádrica cualquiera sea el sistema de coordenadas de referencia. Reemplazados en el sistema de ecuaciones $\mathbf{S_i\ (a_{ij}.u_i) = E.u_j}$ nos permiten hallar las 9 componentes de los tres nuevos ejes u_j (a menos de una constante, ya que el sistema es homogéneo)

La ecuación de la cuádrica referida a ellos será la más sencilla posible: $E_1\, x^2 + E_2\, y^2 + E_3\, z^2 + a_{44}{}^* = 0$

Se la llama forma canónica diagonal de la cuádrica. Sus tres primeros coeficientes son los autovalores E_1 , E_2 , E_3 . Cuando una cuádrica se expresa en su forma canónica diagonal lleva implícita la solución del problema geométrico de hallar sus ejes principales.

Para la mecánica cuántica lo anterior se traduce en que la diagonalización de un operador implica conocer la distribución de los posibles valores observables.

Mecánica cuántica y Series de Fourier

Ya dijimos que las funciones $\o_i$ de ondas materiales que eran solución a los problemas físicos formaban una familia ortogonal de infinitos términos y de cuadrado integrable dentro de un intervalo [a,b] y por lo tanto sirven para representar funciones de onda periódicas de formas diversas con un desarrollo en serie. Son ejemplos de familias ortogonales las funciones seno y coseno de las series de Fourier en el intervalo $[0,2\pi]$, los polinomios de Legendre en el intervalo [0,1] y de Hermite en el intervalo $[0,\infty]$, etc. Así cuando un sistema tiene una función de onda F de una forma determinada, se la puede representar en series de autofunciones del tipo:

$$\mathbf{F(x) = S_i\ C_i\ \o_i(x)}$$

Los coeficientes C_i de este desarrollo en serie son como se sabe las proyecciones de la autofunción respectiva sobre la función de onda real dentro del intervalo de ortogonalidad [a,b]:

$$_a\int^b ø_i(x).F(x).dx = C_i$$

En mecánica cuántica se demuestra que el cuadrado de estos coeficientes son una medida de la probabilidad de que una observación arroje el valor correspondiente al término de la serie en cuestión (armónico). Si la función es de un sólo armónico (por ejemplo senoidal pura), el coeficiente y su cuadrado, la probabilidad respectiva, vale lógicamente la unidad.

Operadores integrales - Transformaciones de Fourier

También se demuestra que la aplicación de la transformación de Fourier TF sobre una función de onda espacial ø lleva a una función de onda de momentos p , con $u=2\pi p/h$:

$$\mathbf{TF\ [ø(x)] = g(u) = 1/(2p)^{1/2}\ _{-\infty}\int^{+\infty} ø(x).e^{-iut}.dt}$$

Ambas representaciones de la función de onda son equivalentes pues contienen la misma información aunque en coordenadas diferentes. Se puede trabajar por lo tanto en cualquiera de los dos espacios: el de posiciones o el de momentos.

La transformada de Fourier de un tren de ondas senoidales de duración finita es un espectro de difracción en el espacio de las frecuencias. Si el tren de ondas tiene una duración ilimitada, se obtiene un espectro de una raya para cada frecuencia.

En efecto, consideremos un tren de ondas sinusoidales de longitud 2.L y pulsación w de manera que sea:

$f(x) = e^{iwx}$ para $|x| < L$

$f(x) = 0$ para $|x| > L$

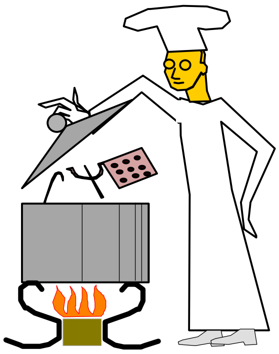
El tren contiene entonces $n=Lw/\pi$ ondas. La transformada de Fourier de f(x) vale:

$$TF\ [f(x)] = g(u)= \mathbf{1/(2p)^{1/2}\ _{-L}\int^{+L} e^{-i(w-u)t}.dt = (2/p)^{1/2}.L.sen(w-u)/(w-u)}$$

Los que han estudiado óptica física saben que g(u) es la amplitud de un haz difractado por una ranura. Su cuadrado $g(u)^2$ representa la intensidad de ese haz, que tiene un máximo en u=0, con ceros en $u=k.\pi/L$ y máximos relativos entre ellos. Cuando L es muy grande en comparación con w se obtendrá una franja muy estrecha en torno de w (prácticamente una raya).

La transformación de Fourier es pues un operador que equivale a un análisis por difracción (prisma, ranura, red). Aplicado a un fotón (tren de ondas) da una figura de difracción. Aplicado a la emisión atómica continua de varias frecuencias da por superposición un espectro de rayas.

Los operadores integrales permiten trabajar no sólo con funciones en el sentido ordinario, sino que son aplicables también a entes matemáticos más amplios que las funciones, llamados "distribuciones". Por ejemplo se pueden aplicar tanto a una carga o masa distribuida, representada por una función ordinaria, como a una carga o masa concentrada puntual de densidad infinita en un punto, representada por una "delta" de Dirac (una distribución).



LA COCINA CUÁNTICA: Algunos físicos o seudo físicos se sienten molestos porque en mecánica cuántica se aplican recetas para resolver ciertos problemas, conjuntos de fórmulas y métodos aparentemente sin fundamento matemático conocido. Y lo que más les incomoda es que estos métodos tienen éxito, porque resuelven el problema.

En realidad, los fundamentos existen, aunque sean poco conocidos: La teoría matemática de los espacios de Hilbert (espacios de infinitas dimensiones de los que se hablará en seguida) encuadran perfectamente con todos los métodos conocidos de la mecánica cuántica ya que abarcan sucesiones de números (vectores), sucesiones de funciones (series ortogonales) y distribuciones.

Pero aún admitiendo que falten fundamentos matemáticos, estos pueden venir o justificarse luego: ¿No ocurrió acaso eso mismo con el cálculo operacional del electricista Heaviside, quién se dio el lujo de resolver arduas ecuaciones diferenciales como si fueran simples ecuaciones algebraicas, con un método formal que después encontró justificación en las transformaciones de Fourier y Laplace?

¿Y qué pasó con la delta de Dirac antes de que se descubriera su conexión con la teoría de las distribuciones? Pues que se la inventó y usó exitosamente para representar una densidad de masa o carga infinita. Después vino la justificación matemática que tranquilizó a los más exigentes.

MECÁNICA CUÁNTICA Y ESPACIO DE HILBERT: Se estudia en matemáticas el espacio de Hilbert como un espacio de infinitas dimensiones, generalización de un espacio vectorial de n dimensiones. Como en éstos, en el espacio de Hilbert se definen la suma de vectores, el producto escalar y el concepto de distancia pitagórica, con las mismas características que en los espacios de n dimensiones.

La conservación de las propiedades esenciales anteriores se verifica no sólo para sucesiones de componentes escalares numéricos (reales o complejos) sino también para sucesiones $f_1(x)$, $f_2(x)$, $f_3(x)$.....de funciones para las que puede definirse un producto vectorial en un campo A de dos cualquiera de ellas:

$$\mathbf{f_i{*}f_j} = \int_A \mathbf{f_i(x)\ f_j(x)\ dx} = d_{\mathbf{i,j}}\mathbf{.N}$$

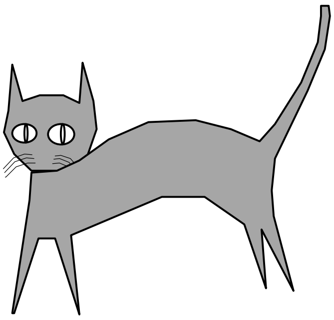
para $\delta_{i,j} = 0$ si $i \neq j$ y $\delta_{i,j} = 1$ si $i=j$ (Delta de Krönecker)

Generalizando el concepto geométrico, se dice que las funciones anteriores forman una familia ortogonal cuya norma vale N

Los problemas de mecánica cuántica encuentran en el espacio de Hilbert el marco más general para su estudio ya que como se dijera antes en él tienen cabida como componentes sucesiones cualesquiera de números reales o complejos, funciones y distribuciones.

MECÁNICA CUÁNTICA, FÍSICA Y METAFÍSICA

Existe la tendencia de relacionar teorías físico-matemáticas más o menos novedosas como la relatividad o la mecánica cuántica, con aspectos que trascienden al verdadero objeto de las mismas: el de representar lo mejor posible los hechos experimentales en cierto ámbito.



En particular la mecánica cuántica ha dado origen a una serie de elucubraciones metafísicas al querer traducir sus leyes microscópicas a la realidad macroscópica. Así se habla de ciertas paradojas donde se extrapolan resultados de experiencias con micropartículas a situaciones corrientes donde se las reemplaza por objetos o animales domésticos, sacando conclusiones estrafalarias. El lector puede divertirse (solamente eso) con la famosa paradoja del gato de Schrödinger, que personalmente dudo se le haya ocurrido al genial austríaco.

En el otro extremo, existen los otros que impresionados por el acoplamiento entre objeto y observador, llegan a sospechar que bien puede pasar que la partícula no exista mientras no se la observe.

Así Eddington no cree que el positrón exista, sino como construcción matemática salida de las ecuaciones de Dirac.

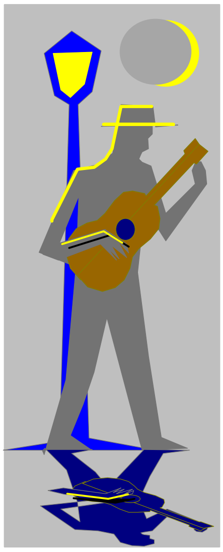
Cuando se ve la estela de una partícula que se curva exactamente al revés que la de un electrón en una cámara de niebla, lo natural es pensar en un positrón. Resulta práctico admitir que dentro de la cámara hay "algo" que se comporta como un electrón de carga positiva que está y se mueve aunque nadie se digne observarlo.

En cambio parece un tanto rebuscada la idea de que la Naturaleza nos haya preparado un escenario con un positrón actor, que se fija antes de salir si en la platea hay algún observador.

Creer que nuestros símbolos "son" la realidad no es una posición sensata, sobre todo después de comprobar que en el micromundo no se puede hablar de partículas como si fueran meras masas puntuales. Pero es casi más insensato desechar todas las imágenes después de someterlas a un análisis desproporcionado.

Si cada vez que vemos una de esas delicadas nubes cirrus flotando en el cielo o un arco iris maravilloso después de una lluvia, nos concentramos exclusivamente en el fenómeno físico, corremos peligro de despreciar sus hermosas formas, signos de poesía y belleza que nos envía el Creador.

-o-o-o-

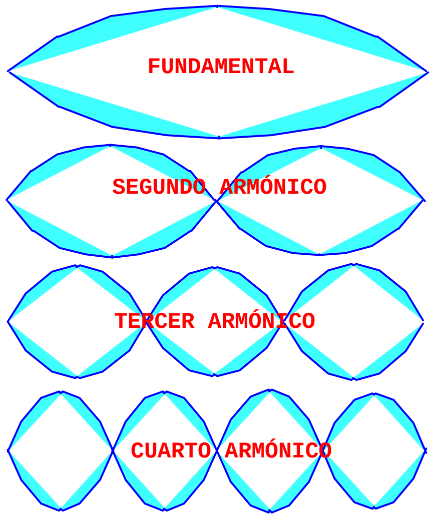


GUAPO DEL 900
ENSAYANDO UNA
SOLUCIÓN ARMÓNICA

Confesiones de sabios

Periodista - Dr Schrödinger, ¿Ud. sabía lo de los espacios de Hilbert cuando propuso su fórmula?

Schrödinger - En absoluto. En cambio sabía bastante acústica. Hoy día nadie estudia acústica. Y no digo ondas sino específicamente acústica: el tratado del sonido. Es una lástima, porque es útil y además divertida.

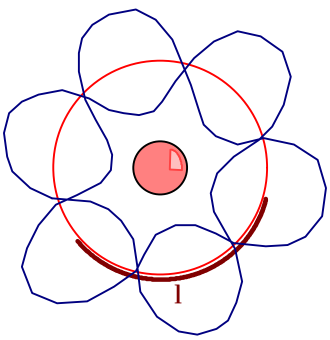


MODOS DE VIBRACION ESTACIONARIOS PARA UNA CUERDA SUJETA EN LOS EXTREMOS

P - ¿Por que la considera tan importante?

S - Además de gustarme la música, porque me sugirió que debía buscar una expresión de onda estacionaria para la función de onda, como la de una cuerda de guitarra. Mire, amigo, si Vd. sabe acústica y busca una función que debe ser periódica, estar confinada y ser estacionaria, no le cabe otra: la imagen de una cuerda de guitarra fija en sus extremos, con sus tonos fundamentales, sus armónicos, sus nodos y vientres, sus múltiples formas de vibrar o “modos”. Si se imagina una forma de onda cualquiera como dibujo inicial impreso por el primer rasguido, deberá aplicar el algoritmo de las “series de Fourier” para expresarla como una superposición de armónicos.

P - Pero las series de Fourier se estudian como caso particular de series de funciones ortogonales, derivadas a su vez de la teoría de los espacios de Hilbert.



Ondas estacionarias en el Modelo de Bohr

S - Eso es para un matemático. Pero un físico primero estudia una cuerda de guitarra, después la serie de Fourier y si le queda tiempo otras series. Ya ve Vd. que la mecánica cuántica ondulatoria no tiene más que soluciones periódicas, autofunciones (de senos y cosenos), series de autofunciones, números de nodos (que representan números cuánticos). Algunos hablan de autofunciones y autovalores, que son la misma cosa.

P - Pero la interpretación matricial de Heisenberg....

S - Es otra forma equivalente de lo mismo. Funciones ortogonales recuerdan a vectores que están en ángulo recto, de allí que su producto sea nulo. La representación matricial, en forma de tabla, es una buena herramienta para describir distribuciones de energía en el espacio. Las observaciones y mediciones están bien representadas por operadores matriciales. Pero las funciones de onda tienen una connotación visual preferida: Fíjese si no que la mayoría de las veces es *mi ecuación* la que se plantea en los problemas.

P - He visto que su ecuación puede plantearse en forma general, es decir no solo independiente del tiempo, en cuyo caso da una solución estacionaria, sino también dependiente de aquél.

S - Ah, si, claro...Si el sistema no tiene límites se puede aplicar la ecuación de una onda libre, dependiente del tiempo en vez de estacionaria. Por ejemplo en un modelo de cristal lineal con potencial periódico en el espacio creado por lo núcleos (Krönig-Penney), mi ecuación temporal aplicada a los electrones que circulan en ese medio fue resuelta por Bloch. Es una solución muy práctica, que permite predecir la conducción eléctrica en medios semiconductores. No pocos desarrollos de estado sólido se deben a este modelo.

Dejamos a Schrödinger, satisfecho con su ecuación, y abordamos a Heisenberg, un físico medio filósofo, muy alemán y muy riguroso.

P - Dr. Heisenberg, ¿su principio de indeterminación está contenido en la mecánica cuántica matricial o es una formulación aparte?

H - Está dentro de la mecánica cuántica en general (ni matricial ni ondulatoria ni integral). A mí se me ocurrió elevarlo a la categoría de principio, esto es una ley con mayor jerarquía que la particular visión que da un modelo determinado.

P - ¿Cuál es su formulación más adecuada?

H - El principio de incertidumbre, o mejor de **indeterminación**, dice que "Existe un **límite natural** en la precisión con que pueden medirse **simultáneamente** dos coordenadas independientes de una partícula. La cuestión no tiene que ver con los **errores de observación** inherentes a aparatos y método y **SÍ** en cambio con la **simultaneidad de las medidas**".

La expresión matemática del Principio de Indeterminación es ***Dp.Dx » h*** , que se lee "El producto de las imprecisiones en la determinación simultánea del momento **p** y la posición **x** de una partícula es constante y su valor tiene que ver con la constante de Planck h"

P - ¿Podría aclararnos lo de la simultaneidad y lo de la imprecisión inherente a los aparatos?

H - ***Ja wohl, mein Herr!:*** La simultaneidad es una condición ineludible cuando se desean fijar las coordenadas generalizadas de una partícula en vistas a proponer sus leyes de movimiento. Y esa simultaneidad es la que crea la indeterminación: si posición y velocidad se midieran por separado, una después de la otra, no habría más límites que la impuesta por los aparatos o el método de medición en esas determinaciones. Una iluminación con longitudes de onda arbitrariamente cortas nos acercaría indefinidamente a imágenes de manchas de difracción cada vez menores. Un aparato cada vez más sensible daría mediciones de momento o velocidad cada vez más precisas. Pero determinar las dos cosas juntas con precisión indefinida, eso sí que NO se puede.

P - ¿Es porque el fotón de longitud de onda corta golpea más fuertemente contra la partícula y modifica la velocidad después de la observación?

H - ***Naturlich!*** La imprecisión en el momento es inversamente proporcional a la longitud de onda $\Delta p \approx h/\lambda$. La imprecisión en la imagen (posición) es proporcional a la longitud de onda $\Delta x \approx \lambda$. El producto de ambas es independiente de la longitud de onda, dependiendo sólo de h

P - ¿Y qué nos dice de su modelo matricial?

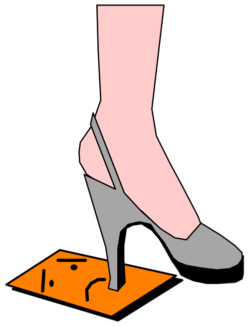
H - Las matrices son algo mágico: cuadros abstractos de números que sin embargo pueden representar todo, o casi todo. Desde un átomo a la economía del mundo. Yo las prefiero a las funciones y a las distribuciones.

P - Pero las matrices son a veces incómodas de operar en la práctica. Pruebe de transponer a mano una matriz de ..., no digamos mucho,...diez filas por diez columnas.

H - ¿A mano? ¡Ni loco! Para eso tengo mi PC . En cualquier hoja de cálculo puedo operar con matrices. ¿Nunca probó?: Le mostraré....

Dejamos a Heisenberg trabajando con su PC y salimos en busca del Dr. Paul M. Dirac.

La función "delta" de Dirac



Aproximación a la Delta de Dirac

Lo encontramos en uno de esos clubes de Londres, donde no entran mujeres. Así que mientras mi esposa Z esperaba afuera, paseando por Hide Park , yo hice la entrevista. Me invitó con un té, mientras contaba:

Dirac - En esa época yo necesitaba una función que representara una carga concentrada en un punto: una partícula como el electrón, por ejemplo.

Cronista - Entiendo: la densidad de una partícula sin extensión es infinita, ya que es el cociente entre su masa m (finita) y su volumen V=0.

D - Exacto, mi estimado A. Pensé entonces en definir esa función cuyo valor en un punto sería infinito y cero en todo otra región del espacio.

C - Un raro espécimen, por cierto.

D - Mire, no lo es tanto. Piense en una dama de 50 Kg parada en una sola pierna sobre el pequeño taco de su zapato. ¿Ready?

C - Listo. Me imagino a mi querida esposa con los elegantes zapatos que estará comprando ahora en Harrod's. Tienen un taco fino y largo.

D - Bien, bien. Celebro que tenga una esposa elegante, que invierta en zapatos ingleses (hechos con cuero argentino). Dígame ahora, Mr.A, ¿qué superficie tiene el taco?

C - Un centímetro cuadrado.

D - ¿Cómo representa la presión en el parquet de su casa?

C - Veamos...El parquet soporta una presión de 50 Kg/cm^2. La carga sobre el piso es una función que vale 50 bajo el taco y cero en el resto. Un prisma de base en forma de taco: Ç

D - Bueno. Supongamos que el taco ya perdió la tapita por el uso, a pesar de ser producto del UK. Se trata de uno de esos tacos de aluminio con un tornillo en la punta. La superficie de apoyo es de 0,1 cm^2 , por lo tanto la presión ahora es de 500 Kg/cm^2.

C - ¿Eso es una delta de Dirac?

D - Todavía no pero va en camino de serlo: supongamos ahora que su esposa pisara con el taco una tachuela que dejó su nietito a medio clavar, cuya punta está bien afilada y presenta una superficie de medio milímetro cuadrado: la presión resulta en ese caso: 50Kg/0,005cm^2 = 10000 Kg/cm2

C - No me diga que todavía no llegamos....

D - No llegaremos nunca en teoría, pero en la práctica para el pobre parquet la presión es una función delta: cero en todos lados menos en una pequeña región casi puntual: allí un valor enorme. Si integro la presión en toda la superficie del piso ¿que fuerza obtengo?

C - Cincuenta kilos.

D - Right!. Esa es la idea: una distribución infinita en un punto, que integrada da un valor finito.

C - ¡Ahora caigo! Es la función derivada de un escalón. Necesaria para que distribuciones puntuales soporten operadores integrales.

D - Vd. lo ha dicho, mi estimado señor: mi delta representa algo concentrado dentro de una ecuación integral: una fuerza, un impulso, una raya espectral. Los operadores integrales de Laplace y Fourier, que transforman el espacio real al simbólico, aceptan tan bien a mi función delta como a una función ordinaria, por ejemplo seno, coseno, logaritmo, exponencial o polinomio.

C - Los matemáticos tendrán que ampliar el concepto de función, incluyendo a su delta.

D - Ya lo han hecho; han llamado "**distribuciones**" a "cosas" que como mi delta, no encajan exactamente en la definición de función, pero que en cambio son transformables en funciones mediante operadores integrales como los de Fourier o Laplace.

C - Le agradezco su tiempo y su exquisito te, Mr. Dirac.

D - Don't mention it, dear A. ¡Ah, y por favor!..., resérveme una copia del libro cuando esté listo. Avíseme cuando la tenga a: *pdirac@faradaysoc.gov.uk*

-o-o-o-

Fourier, Taylor y Sadosky

El Barón Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) fue un famoso científico y hombre público francés. Participó en 1798 de la expedición francesa a Egipto. Fue gobernador del Bajo Egipto y Prefecto del Departamento Isère. Napoleón Bonaparte lo nombró barón en 1808. A Fourier debemos un estudio completo sobre la transmisión del calor que data de 1822. Como subproducto de ese trabajo ha quedado una herramienta matemática insustituíble para transformar funciones de forma cualquiera en una serie suma de funciones armónicas: la famosa "Serie de Fourier, la más conocida de las series ortogonales ya mencionadas.

Brook Taylor (1685-1731) fue un geómetra inglés discípulo de Newton, que produjo en 1715 una memoria bajo el título de **"Methodus incrementarun directa et indirecta"** , en el que presenta la famosa "fórmula de Taylor", que aproxima una función derivable a la serie de potencias única respectiva. Taylor expresa los coeficientes de esa serie de potencias en base al valor de las derivadas sucesivas de la función en un punto.

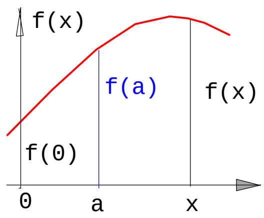
El Dr.Manuel Sadosky, una gloria de las matemáticas argentinas, nos decía a los alumnos de ingeniería, en una de sus magistrales clases allá por el 1958:

- Las series integrales de Fourier y otras series ortogonales sirven para representar una curva en base a sus propiedades globales en un intervalo. En cambio las series de potencias construyen la función a partir de las propiedades diferenciales en un punto, a saber: el valor de la función y el valor de las derivadas sucesivas en ese punto. Algo realmente notable: ¡reconstruir una curva en un intervalo extenso en base propiedades microscópicas en un punto!.

- Una serie de potencias es un polinomio infinito del tipo: $a_0+a_1x^1+a_2x^2+...+a_nx^n$

- Si planteamos la igualdad entre una función f(x) derivable en el punto x=0 y la serie de potencias única convergente que la representa, podemos poner:

$f(x)= a_0+a_1x^1+a_2x^2+a_3x^3...+a_nx^n$, de donde reemplazando x=0 es a_0=f(0)



Ya encontramos el primer coeficiente. Sería bueno encontrar un operador que aplicado a ambos miembros de la ecuación fuera anulando todos los términos de la serie menos uno: probemos derivando sucesivamente ambos miembros:

$f^1(x) = a_1 +2a_2x+3a_3x^2...+na_nx^{n-1}$ de donde reemplazando **x=0 es $a_1=f^1(0)$**

$f^2(x)= 2a_2+3.2a_3x...+n.(n-1)a_nx^{n-2}$ de donde reemplazando **x=0 es $a_2=f^2(0)/2$**

$f^3(x)= 3.2a_3...+n.(n-1)(n-2)a_nx^{n-3}$ de donde reemplazando **x=0 es $a_3=f^3(0)/3!$**

....

$f^n(x)= n.(n-1)(n-2)...2.1.a_nx^{n-n+1}$ de donde reemplazando **x=0 es $a_n=f^n(0)/n!$**

Entonces podemos reemplazar los coeficientes a_0, a_1, a_2...a_n , en función del valor de las derivadas sucesivas en el origen, quedando:

$f(x)= f(0) + f^1(0).x + f^2(0)/2.x^2 + f^3(0)/3!.x^3... + f^n(0)/n!.x^n$ (Serie de Mc Laurin)

Considerando el valor de referencia en **a,** para lo cual hacemos el cambio de variable x por (x-a) resulta algo más general:

$f(x)= f(a) + f^1(a).(x-a) + f^2(a)/2.(x-a)^2 + f^3(a)/3!.(x-a)^3... + f^n(a)/n!.(x-a)^n$ (Serie de Taylor)

El Dr. Sadosky sigue explicando:

- De manera análoga, el principio matemático de la serie de Fourier es plantear la equivalencia entre una función f(x) cualquiera y una serie infinita de senos y cosenos, así:

$f(x) = C_0+S_1.sen(x)+ C_1.cos(x)+S_2.sen(2x)+ C_2 cos(2x)+....+S_n.sen(nx)+ C_n .cos(nx)$, o mejor , agrupando se divide en dos series, una de senos con coeficientes S y otra de cosenos con coeficientes C:

$f(x) = C_0 + S_1.sen(x) +S_2.sen(2x) +....+S_n.sen(nx) + C_1.cos(x) + C_2 cos(2x)+.... + C_n .cos(nx)$,

El asunto está en encontrar los coeficientes que hagan converger rápidamente la serie. Fourier encontró la forma, aplicando a ambos miembros un operador que anulara sucesivamente todos los términos menos uno. Las funciones ortogonales vienen en nuestra ayuda, porque su producto escalar es nulo para dos funciones diferentes (vectores perpendiculares) y no nulo para dos funciones iguales (vectores paralelos o sea una elevación al cuadrado)

Aplicamos un operador integral a ambos miembros, para plantear esos productos escalares:

$$\int_0^{2\pi} f(x)dx=2\pi C_0 + \int_0^{2\pi} \{S_1.sen(x)+C_1cos(x) +S_2.sen(2x)+C_2cos(2x)+....+S_n.sen(nx)+C_ncos(nx)\}dx$$

y como toda la integral de cada uno de los términos del segundo miembro es nula, ya obtenemos el primer coeficiente:

$\mathbf{C_0=1/(2\pi)\int_0^{2\pi} f(x)dx}$, que es el valor medio de la función en el intervalo $0-2\pi$

Para que se anulen todos los términos del segundo miembro menos el que contiene el coeficiente S_1 hay que integrar ambos miembros entre 0 y 2π los términos multiplicados por **sen (x)**

Entonces resulta, multiplicando ambos miembros por **sen (x)** lo siguiente:

$$\int_0^{2\pi} f(x)\,\mathrm{sen}(x)\,dx = C_0\int_0^{2\pi} (\mathrm{sen}(x)\,dx + S_1\int_0^{2\pi}\mathrm{sen}^2(x)\,dx + \int_0^{2\pi}\{S_2\,\mathrm{sen}(2x)+\dots+S_n\,\mathrm{sen}(nx)\}\,\{\mathrm{sen}(x)\}dx$$

El único término no nulo del segundo miembro es $S_1\int_0^{2\pi}\mathrm{sen}^2(x)\,dx = S_1\cdot\pi$

De donde $\mathbf{S_1=1/\pi \int_0^{2\pi} f(x)\,\mathrm{sen}(x)\,dx}$

y en general $\mathbf{S_k=1/\pi \int_0^{2\pi} f(x)\,\mathrm{sen}(kx)\,dx}$

Del mismo modo se demuestra que los coeficientes de la serie de cosenos valen $\mathbf{C_k=1/\pi \int_0^{2\pi} f(x)\cos(kx)\,dx}$

- Euler demostró que de todos los coeficientes posibles, los de Fourier S y C son los que mejor ajustan la serie a f(x). Ésta puede ser casi cualquier función, quebrada y aún discontinua en algunos puntos del intervalo. Casualmente es lo bueno del asunto, porque podemos representar ondas cuadradas, triangulares, picos agudos y hasta distribuciones, como la delta de Dirac.

Comentarios en el intervalo

La forma brillante que el Dr. Sadosky tenía para explicar estos temas hacía que en el intervalo de sus clases se siguiera hablando del asunto con entusiasmo.

En un grupo de estudiantes, se comentaba:

- Las aplicaciones de las series de Fourier a la acústica y a la electricidad son tan importantes que esas disciplinas estarían en pañales sin esa herramienta.
- ¿Se habrán dado cuenta Taylor o Fourier de la trascendencia de sus estudios?
- Lo dudo. En esa época había muy poca comunicación científica y las aplicaciones se hacían al ritmo del lento progreso material de la época.
- ¡Claro!. En cambio hoy día las aplicaciones técnicas y comerciales dan a esos descubrimientos una importancia que trasciende los libros y gabinetes.
- Pero la gente se aprovecha de los desarrollos científicos sin conocerlos. Nosotros en cambio tenemos la suerte de saber que detrás de un “Sputnik” hay desvelos de matemáticos ignorados y políticos con hobbies científicos.
- ¡Ché, que bárbaro el logro del satélite Sputnik! No se podría haber logrado sin estos desarrollos matemáticos. Tengo entendido que el éxito de la cohetería rusa está en gran parte en los sistemas de guía...., en base a representación de funciones con series ortogonales!...

En otro grupo, la conversación toca temas parecidos:
- A veces me pregunto ¿Tenemos derecho a usar un televisor sin saber ni pizca de cómo funciona?
- Creo que aún desde el punto de vista práctico, hay que tener una idea. Por ejemplo para saber si produce radiaciones ionizantes.
- ¿Las produce, en verdad?
- No los blanco/negro. Pero están por aparecer los de pantalla color. Parece que esos tubos funcionan con potenciales de 24 kilovolt, con los que ya hay producción de rayos X....

Un tercer grupo se preocupa por lo inmediato:
- ¿Ya se sabe la fecha del parcial de series?
- Me dijo la delegada de curso que lo piensan tomar dentro de una semana.

Un anuncio interrumpió la “peña” de futuros ingenieros.
- Muchachos, se acabó el intervalo. Sadosky está por continuar la clase.

-o-o-o-

Reencuentro con el sistema absoluto

La historia de la física se parece a veces a las películas policiales o de misterio: reaparecen en escena personajes que se creían muertos y enterrados. Pasó con los corpúsculos luminosos, como recordarán la cita del Rey Pastor. Y también pasó con el movimiento absoluto.

En la década del 60, tras largos años de vigencia de la relatividad indiscutida, ¿quién habría osado pronunciar el nefando concepto de "movimiento absoluto"?

Y sin embargo ocurrió un día de 1965 en que unos radioastrónomos probaban un nuevo radiotelescopio muy potente y sofisticado. Vayamos a su laboratorio a ver qué hacen con su "chiche" nuevo.

La acción transcurre en julio de 1965 en una planicie de New Jersey. Hay unos edificios bajos rodeados de antenas tipo plato. Una de ellas, la más grande, se mueve lentamente. Desde la sala de control, los radioastrónomos Alf y Berny operan el aparato.

Alf - Despacio, Berny. A ver, enfoca al cúmulo 230 del CGE (catálogo general de estrellas). Es un buen emisor de radio.

Berny teclea en una computadora. A poco en el monitor aparece el registro de la emisión. "¡Piiip! READY" . Berny cliquea el mouse en un punto del menú **"TF Spectrum"** y aparece en la pantalla un espectro de rayas. Hay una bien clara de 21 cm de longitud de onda: la de transición ortohidrógeno a parahidrógeno.

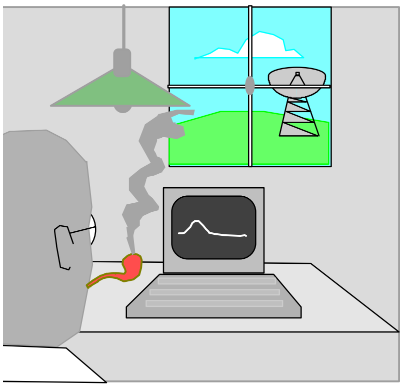
Berny - Bien, bien, ¡Qué potencia, qué resolución!. Este aparato es una maravilla. Fíjate la raya del hidrógeno molecular.

Alf se acerca a la pantalla y señala un pequeño montículo en la curva de longitud de onda mucho menor. - Un momento, Alf, ¿qué es ese otro espectro superpuesto?

Berny - No sé, ¿ruido de fondo, quizás?

Alf - Si, es un típico ruido de fondo, pero... ¿de dónde vendrá?

Berny (con tono sobrador)- ¿Y de dónde va a venir?, ¡del amplificador, pues!. Nos vendieron una porquería.



Alf (un poco irritado) - ¿Me querés decir que un amplificador con circuito de estado sólido enfriado en **helio líquido** (subrayó estas palabras) que cuesta **25 millones** es una porquería que produce ruido de fondo? ¡Ay, Berny!. Si te llegan a escuchar los ingenieros de la "RCA" te electrocutan por difamador. Los tipos trabajaron más de tres años en desarrollar un amplificador "zero noise". Además nosotros asistimos a las pruebas y firmamos los resultados ¿recuerdas?.

Berny - Es cierto: sin señal de entrada, con una amplificación de 10^{10} no había ni pizca de soplido, pero ahora....

Alf - Se llama ruido cuántico. No digas "soplido", como si fuera un equipo de audio. ¿Sos radioastrónomo o Disk-Jockey?

Berny - ¡Bueno, Bueno, tranquilo...!

Alf - A ver estimado Berny, amplificame el espectro del "soplido" o lo que sea, por favor.

Berny teclea y cliquea, obediente: Pliqui, pliqui plic. Clic tiqui, tiqui tac. Luego anuncia:

- ¡Listo!. Máxima amplificación en la banda de 10^{-1} centímetros.

El monitor mostró una curva acampanada. Alf exclamó: ¡No es ruido de fondo, Berny, no lo es!

Berny - Explicame porqué estás tan seguro, Alf.

Alf - El ruido cuántico tiene una distribución de Fermi-Dirac. Esta parece una típica Bose Einstein, de cuerpo negro.

Berny - ¿De cuerpo negro?, A ver, a ver... - Berny sacó una calculadora e hizo la siguiente cuenta:

- El máximo de la radiación está en una longitud de onda de λ=0,09 cm , como nos muestra el espectro. De acuerdo a la ley del desplazamiento de Wien, eso corresponde a una temperatura de cuerpo negro de:

T = b/λ = 0,29 cm ºK / 0,090 cm = 3,2ºK . Es la temperatura del helio que enfría nuestros amplificadores. ¿Ves?. Es el amplificador.

Alf (haciendo un esfuerzo por controlarse) - Pero Berny, muchacho..., piensa un poco: te acabo de explicar que un transistor emite ruido cuántico, distribución de Fermi, con un escalón en el potencial termodinámico. (Va levantando la voz) Esto que tenemos aquí es térmico, es acampanado, ¿ves?. Además la temperatura del helio líquido en ebullición que refrigera el amplificador está encima de 4ºK, exactamente 4,7. **¡¿SABES?!** (Esto último lo dice a voz en cuello).

Mirá, hagamos una cosa, apuntemos la antena hacia un punto oscuro, sin estrellas ni galaxias.

Berny - ¿Te parece el saco de carbón? El polvo cósmico no debería emitir....

Alf - Bueno, dale, al saco de carbón.

Nuevo cliqueo y una corta espera . Afuera la antena se movió pesadamente y se detuvo. Vinieron los consabidos “piiiip” y “Ready”

Alf mira la pantalla y exclama - ¡No lo puedo creer! El espectro fantasma de 1 mm está de nuevo.... - Se queda pensando. De repente toma el teléfono y llama:

- Hola, ¿Dr. Penzias?, ¿Ud. andaba buscando la radiación de fondo del Big-Bang?. Bueno, aquí la tenemos en el nuevo radiotelescopio: tres grados absolutos. ¿Viene para aquí?. ¡Magnífico, lo esperamos! - Alf colgó y le anunció a Berny: - Viene Arno Penzias en seguida: ¡está como loco de contento!

Berny - Mientras hablabas con Arno Penzias comprobé que los valores del máximo varían con la dirección. Primero 0,089, ahora a 0,092.

Alf - Hummm! Típico de un “Red-Shift” (corrimiento al rojo por efecto Doppler).

Hicieron varias mediciones y descubrieron que las lecturas del máximo no eran las mismas. Eran máximas cuando apuntaban hacia una coordenada determinada, que llamaron el punto MAX del cielo.

Esa noche no durmieron: siguieron midiendo en compañía del emocionado Arno Penzias, físico del Laboratorio Bell que andaba buscando hacía tiempo la famosa radiación. Hizo falta un aparato potente como el que estrenaban Alf y Berny para detectarla. Como había sospechado Penzias la misma no era isótropa: tenía propiedades direccionales, haciéndose mínima en las antípodas del punto MAX.

Al día siguiente había en el campo de radiotelescopios un ajetreo fenomenal: La radio, la TV. Penzias hablaba a periodistas especializados:

- Señores, encontramos por fin la radiación que baña todo el universo, reverbero de la gran explosión: el Big Bang.

- Explíquese, profesor - le gritaban algunos con el grabador en mano.

- Hacía tiempo que los astrónomos del Laboratorio Bell y los de la Universidad de Princeton se dedicaron independientemente y sin saber unos de otros a buscar los ecos de la gran explosión (Big Bang) de la que el Creador hizo brotar este maravilloso mundo.

Se hizo un tremendo silencio al escuchar estas últimas palabras, casi bíblicas. Penzias siguió con una versión moderna del génesis:

- Como se sabe, el primitivo universo, pequeño y caliente, se ha ido expandiendo y enfriando adiabáticamente. Tenía sentido buscar una radiación de cuerpo negro que llegara hacia nosotros desde el resto de la materia caliente , que se sigue alejando sin cesar, como lo demostró Hubble.

- Estos muchachos - siguió diciendo señalando a los ufanos Alf y Berny - la hallaron ayer probando este radiotelescopio de enorme potencia.

Todos miraron la imponente antena parabólica, que seguía impasible escudriñando el cosmos.

- Efectivamente,..se detectó la esperada radiación infrarroja que baña todo el universo. Corresponde a la radiación de equilibrio de un cuerpo negro a aproximadamente tres grados absolutos.

- ¡Tres grados! ¿De dónde viene? - preguntaron algunos

- Viene de todos lados: es la radiación de cavidad radiante correspondiente al frío universo expandido actual.

Murmullos y comentarios de admiración. Algunos sentían ya los 3ºK en su piel.

Como un actor de teatro, Penzias siguió:

- Pero hay más, señores: Admitiendo que no estamos justo en el centro de esa explosión, deberíamos recibir la radiación con menor frecuencia en la dirección de mayor velocidad de expansión, por efecto Doppler.

- Claro, claro....¿Y?..... - suspenso....

- Se midió el corrimiento al rojo en todas las direcciones... y por supuesto no es el mismo:

La tierra se mueve con respecto al centro de gravedad del universo: ese punto que el más grande físico de todos los tiempos, con extraordinaria intuición, había relacionado con las estrellas fijas.

Todos se quedaron mudos en ese momento. Algunos aseguran que no fue la voz de Penzias, sino la del propio Isaac Newton la que anunció:

Señores, hoy hemos encontrado el origen de coordenadas del sistema absoluto.

-o-o-o-

Una conferencia

En el programa de conferencias del Salón de Físicos Ignotos, se lee:

Día jueves 2 de marzo de 1995

Disertación y debate a cargo de la Licenciada Función Potencial.

Como moderador actúa el Prof. Sr. Vector Campo

Tema: Fuerzas a distancia: Campos y partículas.

Extracto de la conferencia mencionada aparecido en "Scientific Review", firmado por el periodista y astrónomo amateur Quas Ar.

En la conferencia, la Lic. F.Potencial disertó sobre la eterna preocupación de los físicos por las acciones a distancia. Expuso la tesis de que para dar cuenta de esas acciones a distancia los físicos se sirvieron de toda clase de invenciones. La mayoría de ellas fue en su momento tomada como algo de existencia real.

"Éter, campos y partículas son los personajes de la novela en los que sus autores terminaron creyendo como en personas de carne y hueso. Igual que en el teatro, esos personajes nacen, mueren y hasta resucitan, al servicio de un argumento que cambia incesantemente"

La disertante cita varias veces la obra "Gravedad" de George Gamow, del que es ferviente admiradora

El moderador, Dr. Vector Campo, actuó pobremente como tal, ya que no logró "moderar" sino más bien catalizó un debate final feroz entre todos los asistentes y la disertante.

Campos

Del éter no hablaremos, porque ya está pasado de moda. Los que quieran saber algo de él, busquen en un libro llamado "La Física y los Físicos".

Para dar cuenta de las fuerzas a distancia los físicos inventaron los campos. Newton creó el campo gravitatorio, acción fantasma que llenaba el espacio que rodeaba una masa. Después vinieron los campos eléctrico y magnético, invenciones de Maxwell, Hilbert y otros.

Un campo tiene en general dos acepciones:

1) El lugar del espacio donde se manifiestan acciones producidas por la fuente (masa en le caso de campo gravitatorio, carga en el caso del campo eléctrico, corriente en el caso de campo magnético)

2) La magnitud que se transforma en acción póndero-motriz sobre la materia o la energía.

Los matemáticos definen al campo como magnitud vectorial, operador nabla, gradiente de una función potencial, etc. etc.

Los campos no se ven, pero pueden intuirse con imágenes familiares topográficas o fluidas. Si hacemos esto, nos parecerán cada vez más reales y terminaremos creyendo en ellos.

Unificación de fuerzas a distancia

Sin embargo, en el micromundo de los átomos y las partículas, los campos, que son magnitudes esencialmente continuas, no se prestan bien a la cuantificación que allí reina.

Las acciones a distancia desde el punto de vista estadístico se comprenden mejor como un intercambio de partículas lanzadas por las fuentes y aceptadas por los sumideros. La imagen de una fuerza entre dos partículas se asimila así a la necesaria proximidad y atracción que existe entre el lanzador de la pelota y el que ataja.

Este modelo, esencialmente cuántico, se aviene mejor a la unificación de causas para las diversas acciones a distancia, tan disímiles en magnitud:

La acción gravitatoria casi despreciable frente a la acción eléctrica fuerte entre partículas cargadas se explicaría así por la igualmente disímil frecuencia entre el intercambio de gravitones y fotones, responsables respectivamente de los dos tipos de fuerzas.

Por supuesto que para explicar estas acciones son necesarias partículas de intercambio. De algunas de ellas aún no hay rastros visibles y sólo su necesidad físico matemática las hace creíbles. Por ejemplo el gravitón recién mencionado, que en un principio, fue identificado por Bohr con el neutrino pero después diferenciado de éste. Más tangibles son los mesones del físico japonés Yukawa (1935), responsables de la fuerza más fuerte que se conoce: la que existe entre protón/protón, que mantiene unido a los constituyentes de los núcleos atómicos superando a la repulsión eléctrica entre cargas de igual signo. La teoría de Yukawa se fortaleció un año más tarde (1936) cuando Anderson y colaboradores descubrieron el mesón mu y el Dr.Powell el mesón pi. Estos mesones pi y mu, son partículas unas centenas de veces más pesadas que el electrón.

Vemos entonces que frecuencia, alcance y tipo de partícula de intercambio son los parámetros que definen en este modelo las acciones a distancia. Un modelo cuántico y microscópico que también puede explicar las fuerzas en el macromundo de los cuerpos terrenos y celestes como promedio estadístico de acciones individuales. Algo parecido a lo que ocurre con la termodinámica estadística y la clásica.

Los cosmólogos encuentran en el modelo de partículas un campo interesante de especulación: La actual disimilitud entre fuerzas gravitatorias,(interacción ultra débil) y acciones electromagnéticas (intercambio de fotones), se unifica en magnitud en los albores de la creación, en los que la densidad de materia mucho mayor creaba un flujo de gravitones importante. Así se especula que un millón de años después del Big-Bang (ahora estamos a 15 mil millones) la fuerza gravitatoria podría haber sido del orden de la electrostática, y dos electrones se atraían entonces gravitatoriamente con una fuerza del mismo orden que la de repulsión eléctrica, ésta última supuestamente inalterada hasta hoy.

Partículas Elementales

	Partícula	Masa	Vida media
Bosones	γ (photon)	0	Stable
Leptones	e (electron)	0.511	Stable
	ν_e (neutrino)	0?	Stable
	μ (muon)	106	2.20×10^{-6}
	ν_μ (neutrino)	0?	Stable
	τ (tau)	1784	$<2 \times 10^{-12}$
Baryones	p (proton)	938	Stable ($>10^{33}$ years)
	n (neutron)	939.6	917
	λ (lambda)	1116	2.6×10^{-10}
Mesones	$\pi+$ (positive pion)	140	2.6×10^{-8}
	π^0 (neutral pion)	135	8.3×10^{-17}
	K+ (postive kaon)	494	1.24×10^{-8}
	D+ (D plus)	1868	10^{-13}
	J/ψ (J/psi)	3097	10^{-20}

Últimas tendencias en Física

El descubrimiento de nuevas partículas subatómicas en el laboratorio no cesó desde 1935: a los muones y piones se les sumaron hadrones, hyperones y mesones más pesados (como de dos o tres UMA). Las leyes de conservación de la masa-energía y del momento se vieron acompañadas por leyes cuánticas de conservación y exclusión que obligaron a buscar portadores con momento angular (spin) y energía pero sin carga y sin masa.

Las partículas elementales no duraron mucho enteras: fueron prestamente descuartizadas en grandes aceleradores, partiéndose en otras más elementales llamadas quarks. Por ejemplo un protón está hecho de tres quarks (parece que hay seis clases de ellos). Pero estas novísimas partículas casi no pueden observarse separadas, así que algunos físicos no están seguros de que sean reales. Asimismo hay partículas elementales que no son susceptibles de división ulterior. Se llaman “leptones”; por ejemplo el electrón es un leptón.

Desde los setenta el panorama se fue complicando aún más: La interacción entre partículas elementales como los leptones y elementalísimas como los quarks, exigen la conservación de ciertas leyes de simetría: se conserva la interacción cuando se permutan las partículas en el espacio.

El último grito de la moda en física son las teorías de unificación de fuerzas, que se apoyan en leyes de simetría poco convincentes. Se busca hacer este enfoque más inteligible con “supersimetrías”. Estas teorías exigen que en vez de partículas, los últimos pedacitos de materia sean “cuerdas” o filamentos unidimensionales de no más de 10^{-35} m . Los diagramas espacio temporales de Fennyman con strings resultan superficies en vez de líneas. A estas superficies (algunas cerradas, otras no) se les aplican teoremas geométricos topológicos, que requieren conceptos matemáticos que se van creando y definiendo a medida que se necesitan.

Un ejemplo más de cómo la física lidera a la matemática, simple herramienta que se forma y crece gracias a las necesidades que aquella le impone.

Hasta este punto, el auditorio se había mantenido tranquilo, por no decir un poco aburrido. Pero esta última aseveración produjo un despertar que pronto pasó a reacción explosiva.

En efecto, había en la sala un grupo de matemáticos, que precisamente pensaban hacer preguntas sobre las nuevas teorías cuánticas de campos topológicos. Uno de ellos, el Dr. Nabla, dijo en voz lo suficientemente alta como para que lo escucharan todos:

- ¡Bueno, ahora esas tenemos!. Los físicos nos tienen de emanuenses. ¿Desde cuándo saben matemática?

- Desde siempre - le contestó un físico de otro grupo, y con voz potente preguntó - ¿Y Vds. desde cuando saben física?

- Desde que le enseñamos a Galileo a cuantificar sus estúpidas leyes - dijo Nabla casi gritando.

- ¡Claro, claro!.... También los matemáticos le enseñaron a Newton el cálculo infinitesimal, supongo.

- Tuvo que venir Leibnitz a explicárselo.

- ¡Señores, señores, aún no es tiempo de debate! - dijo el moderador, con tono demasiado suave.

- Es tiempo de debatir si la matemática lidera a la física - dijo un tercero

- Al revés, señor. Como bien dijo la disertante, nosotros los impulsamos a crear nuevas matemáticas. ¿Acaso los tensores y los espacios de Hilbert son creaciones matemáticas?

- No, si van a ser recetas culinarias - dijo el matemático cordobés, Dr.Nero

- Callate, cordobés - le gritaron desde el bando de los físicos - vos debés ser el que le hace las cuentas a la gobernación, que está en quiebra.

El moderador, queriendo contemporizar, dijo:

- Señores, ni la física ni la matemática solas pueden crear un modelo apropiado de la realidad. Juntas en cambio pueden representar al universo y sus leyes. Estamos aquí físicos y matemáticos como un grupo transdisciplinario.

Esto calmó momentáneamente el temporal. Sin embargo, como el Dr. Vector Campo llevaba la física adentro, prosiguió:

- Es cierto que últimamente la matemática está en dificultades para proveer lo necesario para seguir adelante: me refiero a la topología.

Nuevo recrudecimiento de las hostilidades.

- Van a tener que venir al pie de los matemáticos dentro de un tiempo, cuando se les pudra todo ese andamiaje inservible - dijo Nabla

- ¿Llama andamiaje inservible a la topología de una superficie cerrada?. Por ejemplo, consideremos un toro.... - la licenciada Potencial no pudo seguir.

- Deje a los animales en paz, licenciada - le interrumpió Nero - Ellos hubieran hecho una exposición más lúcida que la suya.

- ¡Dr.Campo, intervenga, por favor! - suplicó la disertante al moderador - ¡El doctor me está faltando el respeto!...

En este momento, el moderador Campo, incapaz de dominar la situación con la palabra, quiso sin embargo dar satisfacción a la ofendida dama. Se plantó delante de Nero, amagó un cross corto de derecha y luego tiró un gancho de izquierda que dió por tierra con el matemático.

Los matemáticos quisieron abalanzarse sobre Campo, que se refugió entre un grupo de físicos. Comenzó entonces una refriega fenomenal con heridos y contusos de ambos bandos. El Rector de la Universidad llamó a la policía cuando vió que se comenzaron a usar elementos del salón de actos como proyectiles.

En la comisaría debieron poner a los matemáticos y a los físicos en celdas separadas. El juez condenó a los revoltosos a pagar una fianza de 1000 pesos y a arreglar el salón de actos.

Por su parte, la Licenciada Potencial fué condenada a escribir un apunte esclarecedor sobre el tema de su conferencia, para el libro “La Física y los Físicos”.

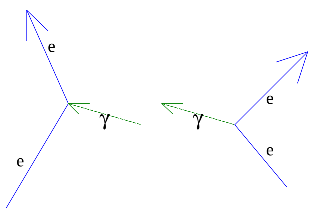
FUERZAS A DISTANCIA POR INTERCAMBIO DE PARTÍCULAS ELEMENTALES

Apunte preparado por la Lic. Función Potencial

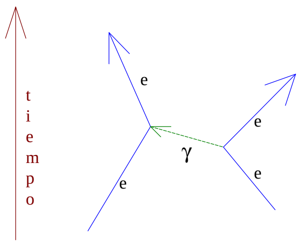
Introducción: La física moderna explica la existencia de fuerzas a distancia entre cuerpos como resultado del intercambio entre ellos de partículas elementales que ya conocemos, como el electrón, el fotón y el neutrino. Y hay otras más que iremos presentando.

La noción de intercambio viene a reemplazar al concepto de campo gravitatorio, eléctrico o magnético, con que la física clásica explicaba las acciones a distancia observadas entre masas, cargas o corrientes eléctricas respectivamente.

El intercambio de partículas es un modelo que explica, a diferencia del modelo de campos continuos, que las acciones a distancia estén cuantificadas, o sea que no puedan variar en forma continua sino a saltos o "cuántos" cada vez que se produce el proceso de intercambio.



Absorción y emisión de un fotón por un electrón



Intercambio de un fotón entre dos electrone

Por ejemplo, de acuerdo al electromagnetismo, una carga acelerada emite o absorbe radiación. Ahora bien, dado que la radiación puede considerarse compuesta por fotones, cuando los electrones y otras partículas con carga sufren aceleración se admite que absorben o emiten fotones.

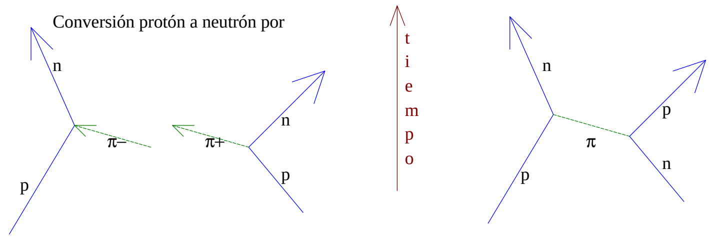
Asimismo, para el electromagnetismo el mecanismo de atracción o repulsión de una partícula cargada por otra con carga de distinto o igual signo, se explica suponiendo que cada una de las partículas crea a su alrededor un campo eléctrico que se propaga a la velocidad de la luz. Cuando éste alcanza a la otra partícula cargada, aparece sobre ella una fuerza igual al valor del campo por el valor de la carga. De otra forma esto se explica con el modelo del intercambio, suponiendo que una de las partículas emite uno o más fotones, que luego son absorbidos sucesivamente por la otra.

Leyes de conservación: Se ha establecido que en los procesos físicos que involucran interacciones entre partículas se mantienen antes y después del mismo las siguientes cantidades:

a) La carga eléctrica total Q
b) El número de electrones Ne
c) El número de protones Np
d) La energía total E
e) El impulso total P
f) El impulso angular total J

Recordemos que impulso o cantidad de movimiento de una partícula es el producto de su masa por la velocidad **p**=m.**v** y que el impulso angular es el momento de la cantidad de movimiento **J**=m.**v** Ù **r** (También se llama momento cinético o drall)

Conversión protón a neutrón por



a) absorción de un mesón negativo

b) emisión de un mesón positivo

Interacción protón-neutrón por intercambio de un mesón neutro

Propiedades de algunas partículas fundamentales:

A continuación vamos a repasar las propiedades de las partículas elementales conocidas hasta ahora, y a presentar algunas otras (mesones) que se descubren al querer explicar las fuerzas dentro del núcleo atómico.

- **ELECTRÓN**: Partícula de masa $m=9x10^{-31}$ Kg y carga $q=-1,6x10^{-19}C$, descubierta por J.J. Thomson en 1897. Un gas de electrones libres cumple la ley de distribución de Fermi-Dirac. Los electrones que giran en órbita de radio r alrededor del núcleo atómico, según el modelo de Bohr, poseen impulso angular cuantizado por el número **n** tal que $\mathbf{J}=m.\mathbf{v}.r=n.h/(2\pi)$. También el momento magnético M en la órbita está cuantizado por otro número $\mathbf{n_f}$ de manera que $M=n_\phi.h/(4\pi c).q/m$. Para explicar fenómenos magnéticos cuánticos anormales en los átomos se requiere que los electrones posean momentos mecánicos **Js** y magnéticos **Ms** propios además de los que resultan de su giro alrededor del núcleo J y M. Es decir que si se los imagina como una carga distribuida en una esfera, ésta debe girar sobre si misma (como la tierra sobre su eje). La cuantificación del fenómeno dada por el análisis espectral fino de la emisión atómica exige que $Js=\pm\frac{1}{2}\ h/(2\pi)$ y $Ms=h/(4\pi c).q/m$. Al factor +1/2 o -1/2 se lo llama valor del "spin" del electrón. Si admitimos que la masa del electrón es de carácter electromagnético resulta que su radio r_e es del orden de 10^{-15}m
- **PROTÓN** : Partícula de masa $1.7x10^{-27}$ Kg y carga $+1,6x10^{-19}C$ descubierta por Rutherford en 1911, que está presente en los núcleos atómicos junto con los neutrones. La fuerza protón-protón y la fuerza protón-neutrón es de las más fuertes que se conocen. Se la atribuye al intercambio de un tipo de partículas llamadas **mesones.** El spin protón vale, como el del electrón, ±1/2
- **FOTÓN** : Cuánto de radiación electromagnética de frecuencia $\upsilon=c/\lambda$, de energía $E=h\upsilon$ y de cantidad de movimiento $p=h/\lambda$ que surge de la hipótesis cuántica de Planck (1900) basada en el estudio de la radiación del cuerpo negro. Un gas de fotones cumple las ley de distribución de Bose-Einstein, para partículas que no mantienen su número constante y poseen spin entero ±1. El intercambio de fotones (absorción/emisión) entre partículas da origen a las fuerzas electromagnéticas.
- **NEUTRÓN** : Partícula de masa $1.7x10^{-27}$ Kg y carga nula descubierta en 1932 por Chadwick bombardeando Be con α (ver página 4) , que se desintegra con una vida media de 30' en un protón, un electrón (emisión β) y un neutrino (ν_o). Su spin vale ±1/2
- **NEUTRINO**: Partícula de masa en reposo de 1/1000 de la del electrón y carga nula, cuya existencia se postuló para balancear la energía y el momento angular de la ecuación de la desintegración del neutrón, la que se cataloga como una interacción de fuerza débil, junto con la fuerza gravitatoria (aún mas débil). El spin del neutrino vale -1/2
- **MESONES** : (Hay tres tipos: positivos, negativos y neutros). Descubiertos por Yukawa en 1935 . El intercambio de mesones explica las interacciones fuertes como la fuerza protón-protón y protón-neutrón. Son partículas con una masa 300 veces la del electrón y pueden tener carga o ser neutros. No poseen momento angular propio (spin=0)

Trabajos de Dirac: Spin y antipartículas

La ecuación de Schrödinger, como se recordará, es la ecuación diferencial de la amplitud Ψ de las ondas materiales de una partícula de energía cinética Ec=E-V (E es la energía total y V es la energía potencial).

La función de ondas para partículas libres es $\Psi=\psi_o.e^{i/h(E.t-\mathbf{r}x\mathbf{p})}$

para t=tiempo, **r**=vector posición , **p** = m.**v** (cantidad de movimiento)

Nótese que Ψ(r,t) es una expresión compleja y vectorial. Su conjugada es Ψ* y se cumple que el producto escalar Ψ.Ψ* en un punto da la densidad de probabilidad de que la partícula se encuentre en ese punto.

Para fenómenos no dependientes del tiempo (estacionarios), se cumple que

$\mathbf{\tilde{N}^2 Y + (8p^2m/h^2).[E\text{-}V].Y=0}$

Por ejemplo la solución a la ecuación anterior para un pozo de potencial infinito de ancho **a** es $\mathbf{y(x)=i.(2/a)^{½}.sen(n.p/a)x}$, con la condición de cuantización de la energía $E=n^2h^2/(8ma^2)$ para n=1,2,3...(auto valores), es decir que el resultado indica que la energía no puede tomar valores cualesquiera.

La ecuación de Schrödinger para el átomo de hidrógeno se plantea con la condición de que la energía potencial valga $V=-(1/4/\pi/\varepsilon)q^2/r$. Aparece en la solución que el momento de la cantidad de movimiento está cuantizado para n=1,2,3... rigiendo la expresión $m.\mathbf{v}\times\mathbf{r}=n.h/2/\pi$: es la misma ecuación que Bohr había impuesto para que su modelo emitiera según las series espectrales experimentales de Lyman, Paschen, etc..

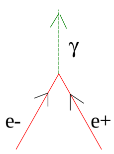
En 1929 P.Dirac publicó un trabajo teórico sobre electrones y protones en el que aplicaba la ecuación de Schrödinger a dichas partículas en movimiento libre, pero en vez de usar la expresión clásica de la energía cinética de la partícula $E_C=1/2m.v^2$, empleaba la de la física electromagnética, que como se sabe toma en cuenta la variación de la masa m con la velocidad v , a saber

$m=m_O/(1-(v/c)^2)^{½}$ de donde

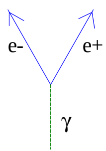
$E_C = m.c^2-m_O.c^2 = m_Oc^2[1/(1-(v/c)^2)^{½}-1]$

Cuando se resuelve la misma con la expresión de Ec dada más arriba, como hizo Dirac, aparecen en la solución que el momento angular propio y del momento magnético propio del electrón pueden tomar solamente los valores cuánticos ya planteados como exigencia experimental, como se recordará, para explicar la estructura fina de los espectros de emisión.

Pero además del efecto de cuantización, aparecen como posibles en la solución de Dirac tanto **valores positivos como negativos para la energía del electrón o del protón**. La teoría de Dirac prevé así la existencia de protones y electrones de **energía negativa**.



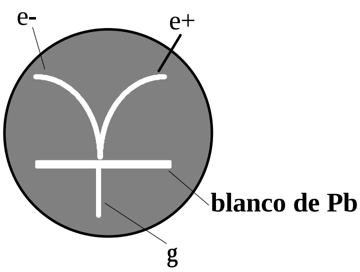
Aniquilación de un par electrón-positrón



Formación de un par electrón-positrón

Según Dirac, un electrón de energía negativa se comporta como un electrón corriente con carga positiva. Sabemos que tal partícula (positrón) se produce en algunas reacciones nucleares. También se han producido en grandes máquinas aceleradoras protones con carga negativa.

Un protón negativo y un electrón positivo podrían llegar a formar un átomo similar al de hidrógeno corriente, pero con cargas cambiadas. En nuestro ambiente de partículas "normales" estas partículas anormales o antipartículas tienen una vida media efímera, ya que cuando se encuentran con sus sosías normales el conjunto se aniquila generando radiación gama, como en el caso de la colisión entre un electrón y un positrón.



Formación de un par electrón - positrón

Inversamente se han observado en fotografías de Cámara de Wilson, la aparición de un par electrón-positrón a partir de la desaparición de fotones gama.

Se ha especulado con que las partículas de carga opuesta pueden llegar a constituir "antimateria" en alguna región del cosmos, donde la materia corriente sería la anormal o rara. No se ha podido efectuar hasta ahora el experimento para ver si estas antipartículas tienen masa negativa o sea si "caen hacia arriba" en nuestro campo gravitatorio, como lo exige la teoría de Dirac.

CLASIFICACIÓN DE LAS INTERACCIONES

I= INTENSIDAD RELATIVA	**P=partícula intercambiada**		
FUERTE **I=1 P=mesón**	ELECTROMAGNÉTICA **$I=10^{-2}$ P=fotón**	DÉBIL **$I=10^{-12}$** **P=neutrino**	GRAVITATORIA **$I=10^{-39}$** **P=? (gravitón)**
Fuerza protón-protón	Fuerza protón-electrón	$n \rightarrow p+e+\nu$	Fuerza masa-masa
Fuerza protón-neutrón	Fuerza electrón-electrón		
Fuerza neutrón-neutrón	Fuerza electrón-fotón		

LOS ÚLTIMOS AVANCES
Gracias a experimentos realizados en la década 1940/50 en aceleradores de gran potencia, se descubrieron una serie de nuevas partículas que mostraron que el protón y el neutrón no eran en realidad partículas elementales, sino que debían formar parte de una familia más vasta. Por desintegración del mesón neutro π se produce un muón y un neutrino. La nueva partícula muón μ tiene una masa 200 veces la del electrón. En 1947 aparecieron seis nuevas partículas, que por ser más pesadas que el protón se llamaron hiperones.

La gran cantidad de partículas llevó a los físicos de estas últimas décadas a construir una hipótesis simplificadora: de que la mayoría de estas últimas son combinaciones departículas más simples llamados QUARKS .

Toda la materia estaría compuesta así por sólo tres clases de partículas:
a) los QUARKS, que son partículas constituyentes otras que se creían indivisibles como los neutrones y protones. Los QUARKS no se conocen libres.
b) los LEPTONES, que son partículas que se encuentran en estado libre (por ejemplo el electrón, el mesón y el neutrino).
c) las llamadas "GAUGE PARTICLES" (ejemplo: el fotón)

-o-o-o-

LA FÍSICA Y LOS FÍSICOS

INDICE ALFABÉTICO

—A—

—B—

—C—

—D—

—E—

—F—

—G—

—H—

—I—

—J—

—K—

—L—

—M—

—N—

—O—

—P—

—Q—

—R—

—S—

—T—

—U—

—V—

—W—

—Y—

—Z—

FIN DE LA OBRA - Se terminó de imprimir el día 26 de abril de 1996