

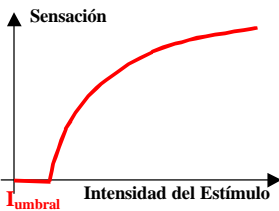
NOCIONES DE LUMINOTECNIA

Generalidades

Se llama **luminotecnia** a la técnica que estudia el uso y aprovechamiento racional de la luz. Ciencias auxiliares de la luminotecnia son la óptica, la electricidad, la **ergonomía**¹ y la economía.

Vimos que luz es una **estrecha banda de radiación electromagnética** que impresiona nuestra vista. Las fuentes de radiación se caracterizan por su potencia radiante y por la manera en que distribuyen la radiación en el espacio. En el caso de la luz, esa potencia y distribución se valoran a través de la **respuesta** de nuestra vista, que transforma la potencia de las ondas que recibe (**estímulo** o excitación o intensidad) en **sensación** luminosa.

Ley de Weber-Fechner



Para la vista, como para cualquier otro sentido (oído, tacto, etc.), **la relación entre estímulo y sensación no es lineal**. Es decir que a doble estímulo no hay doble sensación, sino menor.

Se admite que en un individuo medio se cumple la ley **de Weber-Fechner**: La variación de la sensación es inversa a la intensidad preexistente. Así si estamos recibiendo un estímulo de intensidad I que varía en dI , obtendremos una variación de **sensación** $dS=dI/I$, de donde $S=\ln(I)+\ln(K)$. La sensación no se hace presente (es decir que se mantiene $S=0$) hasta que el estímulo supera un cierto **valor umbral** I_u , así entonces resulta $\ln(K)=-\ln(I_u)$ de donde $S=\ln(I/I_u)$. Asimismo sacando antilogaritmos es $I=I_u \cdot e^S$.

Ejemplo:

Sea S_1 la sensación con $I_1=10 \cdot I_u$ (diez veces el umbral). Entonces $S_1=\ln(10)=2,30$. Cuando la sensación se hace doble, es decir cuando $I_2=2 \cdot I_1$ resulta $S_2=\ln(2 \cdot 10)=\ln(20)=2,99$ (30% mayor).

Gracias a este tipo de **respuesta logarítmica** nuestros sentidos (y la vista en particular) pueden adaptarse a grandes variaciones en los estímulos. Por ejemplo poder

¹ Técnica que estudia cómo adaptar el medio y las condiciones de trabajo a la fisiología y psicología humanas.

ver con la **luz de la luna** y también ver a **pleno sol**, que representa un estímulo cien mil veces mayor.

Fuentes de luz

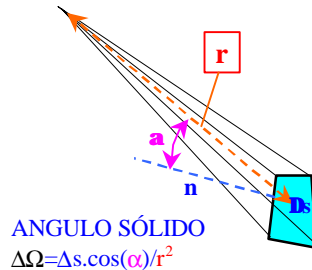
Las **fuentes** de luz o luminarias pueden tener luz propia o bien re-emitir la luz que reciben de otra fuente. Pueden ser puntuales (una arco voltaico), lineales (un **filamento incandescente**) o extensas (un **tubo fluorescente**), según emitan desde un punto, una línea o una superficie.

Podemos considerar a una fuente luminosa como un **conjunto de generadores** que emiten ondas electromagnéticas de diversas longitudes de onda, de las cuales solo algunas aprovechan a nuestra vista. **El rendimiento lumínico** de una fuente de luz está relacionado² con la proporción de potencia emitida en la banda de **0,4 a 0,8 μm** frente a la potencia consumida total.

Conviene también considerar a la luz emitida como **un fluido que brota de la fuente** según una forma de distribución propia, así como en un regador la cantidad de agua y la distribución en el espacio dependen del caudal de la fuente y de la forma del pico.

Magnitudes y unidades fundamentales

La magnitud fotométrica fundamental en luminotecnia es el **flujo luminoso F** , que mide la cantidad de luz por unidad de tiempo que incide sobre una superficie. El flujo es el equivalente del caudal en un surtidor. El flujo total **F_{total}** de una **luminaria** es la cantidad total de luz por unidad de tiempo que emite. El **flujo luminoso** es una valoración óptica de la potencia electromagnética recibida o emitida, y tiene que ver con la sensación de iluminación que la luz produce en un ojo normal. El flujo luminoso mide en **LUMEN** (símbolo=Lm)

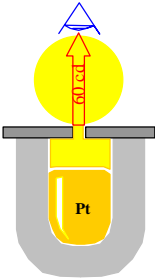


La **intensidad I** de la fuente según una dirección determinada en el espacio, es el flujo por unidad de **ángulo sólido** en esa dirección.

² Esta relación entre potencia y sensación luminosa, que no es lineal, depende de la respuesta del sentido de la vista

Ángulo sólido: Se llama ángulo sólido, por analogía con el ángulo ordinario (relación entre arco y radio), a la relación adimensional entre superficie de la calota esférica y el cuadrado del radio de la esfera correspondiente. Si se trata de una superficie pequeña **Ds** cuya perpendicular forma un ángulo α con la dirección de **r**, ella subtiende un ángulo sólido que vale $D\Omega = Ds \cdot \cos(\alpha) / r^2$.

La unidad del ángulo sólido es el **estereorradián**, equivalente a una superficie de un metro cuadrado a la distancia de 1 metro. El ángulo sólido correspondiente a una superficie esférica completa vale $W_{est} = 4\pi r^2 / r^2 = 4\pi$



En la figura, la pequeña superficie **Ds** recibe un pequeño flujo **Df** de la fuente que está a la distancia **r**

La intensidad **I** de la fuente en esa dirección vale pues $I = Df / D\Omega$

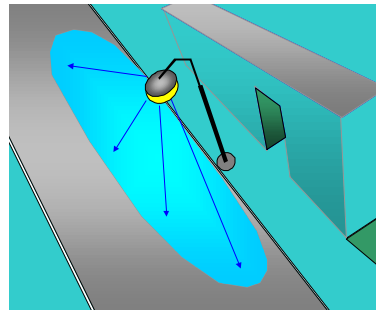
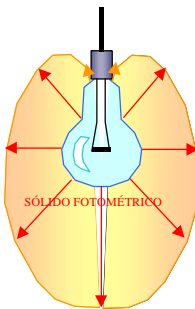
$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\Omega} = \frac{\Delta\phi}{\frac{Ds \cdot \cos \alpha}{r^2}} = \frac{\Delta\phi \cdot r^2}{Ds \cdot \cos(\alpha)}$$

La intensidad de una luminaria se mide en CANDELAS.

(I[Cd])

Para reproducir una intensidad relacionada con la candela, imagínese un crisol no totalmente lleno con platino a la temperatura de fusión³ (**1769°C**) que deja salir la luz de la cavidad por una tapa con una ventana de **1 cm²** de superficie. Esa ventana emite perpendicularmente una intensidad de **60 Cd**

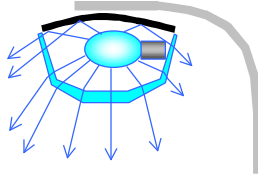
1 Cd = 1Lm/sr (lumen por estereorradián)



La **intensidad de una fuente** a una **distancia grande** en comparación con su **extensión**, es un valor que depende de la dirección entre el punto considerado y la fuente. Por ejemplo, en una lámpara de incandescencia colgada de un portalámparas común, la intensidad es nula hacia arriba, por la sombra que proyecta la

³ Debe quedar una cavidad vacía entre el platino y la tapa, donde se homogeneiza la radiación. Se obtiene así un radiador de "cuerpo negro", independiente del poder emisor del platino en fusión.

rosca de la lámpara y el portalámparas. Hacia abajo la intensidad tiene un valor máximo, mayor que en la dirección horizontal determinada por los dos soportes del filamento, que también proyectan algo de sombra. Hacia adelante y hacia atrás del dibujo la intensidad es también máxima. Si representamos la intensidad con flechas de largo proporcional a su valor según la dirección, podremos dibujar un sólido representativo de la misma, que en luminotecnia se llama “**sólido fotométrico**”



El sólido fotométrico de una luminaria para la vía pública tiene una forma alargada en el sentido de la calle. Esto se logra modificando la distribución propia de la lámpara (usualmente una de vapor de mercurio de alta presión) mediante un reflector superior y una cubierta refractora de vidrio por debajo.

La **iluminación E** es el cociente entre flujo y área iluminada o sea (ver la fórmula anterior): $E = \Phi / S = I \cdot \cos(\alpha) / r^2$

La iluminación se mide en **LUX**. $1 \text{ Lx} = 1 \text{ Lm/m}^2$ (**E[Lx]**)

E depende de la **intensidad** de la fuente en la dirección considerada, la **distancia** a la fuente y la **inclinación** de los rayos con respecto a la normal a la superficie.

TABLA DE ILUMINACION RECOMENDADA SEGÚN ACTIVIDADES

Lugar o Actividad	Iluminación recomendada (Lx)
Vía pública, playas, pasillos de poco tránsito	5 a 20
Pasillos y otros lugares de paso. Depósitos	20 a 50
Salas de espera o de trabajo no continuo	50 a 100
Aulas, bibliotecas, talleres de montaje	100 a 500
Salas de dibujo, talleres mecánicos y costura	500 a 1000
Quirófanos, mecánica de precisión	1000 a 5000

El **umbral de una vista normal** es de 10^{-10} Lx . La luna llena produce **0,25 Lx**. A pleno sol se obtienen 10^5 Lx

Esta relación de intensidades (sol/luna) de 10^{15} representa para la vista una relación de sensación de $\ln(10^{15}) = 34 \text{ veces}$

Se llama **brillo b** de una superficie emisora para una dirección dada, al cociente entre **intensidad y el área** de esa superficie proyectada normalmente en la dirección del observador. La superficie emisora puede tener luz propia o bien estar iluminada por otra fuente. El brillo se mide en **Cd/m²** (candela por metro cuadrado). Un submúltiplo de esa unidad se llama "**Stilb**".

$1 \text{ sb} = 10^{-4} \text{ Cd/m}^2 = 1 \text{ Cd/cm}^2$. Por ejemplo, el brillo de la unidad patrón de platino fundido de **60 Cd** vale **60 sb**

El brillo es la **intensidad específica** de una fuente en una dirección dada. Es proporcional (aunque no linealmente) al estímulo luminoso que recibe el ojo. El mismo brillo crea sensaciones diferentes según la zona de la retina donde se produzca la imagen. La sensación es mayor cuánto más cerca de la fóvea se instale la imagen. Por ese motivo, y además por el efecto protector de los arcos superciliares sobre los rayos que superen un cierto ángulo con la horizontal, (efecto visera), las fuentes brillantes de iluminación deben colocarse de manera que sus rayos lleguen al ojo formando un ángulo mayor que 15° con la horizontal.

El deslumbramiento (o encandilamiento) es el efecto de saturación y bloqueo de la percepción visual que crean imágenes de brillo superior a un valor crítico (aproximadamente 1 Sb) que se produzcan cerca de la fóvea. El deslumbramiento es tanto mayor cuánto más contraste haya entre objeto brillante y fondo. Las luces largas de los autos en la carretera producen deslumbramiento, debido a su intenso brillo (alrededor de 5 Sb), a su horizontalidad y al contraste con la oscuridad reinante. Para moderar su efecto conviene desviar ligeramente la vista de los faros del vehículo que se acerca por la mano contraria, apartando así su imagen de la zona más sensible del ojo.

El flujo conservativo

Si se considera que el medio no absorbe luz (por ejemplo una atmósfera diáfana), el flujo de luz es **conservativo**, vale decir que no se consume en ningún punto. Si en cambio hay nieblas, humos o en general medios absorbentes, el flujo total se va consumiendo en tales medios y su valor mengua al irse alejando de la fuente. En general en luminotecnia se admite, salvo casos muy especiales, que el flujo se conserva, es decir que los medios conductores de la luz son perfectamente **transparentes**.

Variación de la iluminación con la distancia y el ángulo de incidencia de los rayos

Lo común es que los haces de las luminarias sean más o menos divergentes a partir de la fuente. Que el flujo de luz se conserve significa que en caso de haces divergentes, la iluminación irá disminuyendo con la distancia, ya que la cantidad de luz constante se distribuye en una superficie cada vez mayor. En caso particular de una fuente que emita hacia todos lados con igual intensidad y cuyo flujo total valga **F_{total}** , produce sobre es-

feras de radio r concéntricas con esa fuente una iluminación que disminuye con el cuadrado de la distancia, a saber $E=F/(4\pi r^2)$

Si la normal a la superficie S que recibe los rayos forma con los mismos un ángulo α , la iluminación **disminuye con esa inclinación**, ya que el mismo flujo se reparte en una mayor superficie $S'=S/\cos(\alpha)$, y de acuerdo a esto es $E=F/(4\pi r^2)/\cos(\alpha)$

En el caso límite que $\alpha=90^\circ$, los rayos pasan rasantes a la superficie y ésta no es iluminada ya que no recibe flujo.

A la relación $I_{me}=F/(4\pi)$ se la llama **intensidad media esférica** de la fuente, y corresponde a la intensidad de una fuente que tuviera el mismo flujo total que la fuente en cuestión, pero con igual intensidad en todos los sentidos. En otras palabras, si la fuente tuviera una distribución de flujo pareja, radiaría una intensidad igual a la media esférica hacia todos lados. Como en general las fuentes no producen una distribución uniforme (véase el ejemplo de la lámpara incandescente), su intensidad en algunas direcciones es mayor que la I_{me} y en otras menor

Ejemplo: Una lámpara incandescente que consume una potencia eléctrica de **40 W** emite, según el fabricante, un flujo total de **430 Lm**.

1º) ¿Cuál es su intensidad media esférica?

Respuesta 1: $I_{me} = F_{total}/(4\pi) = 430/12,57 = 34,21$
Cd

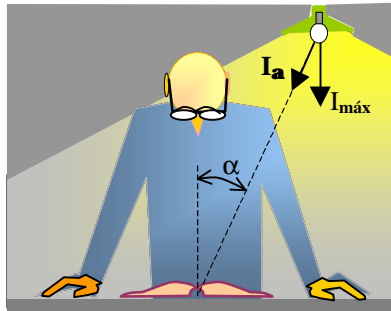
2º) Suponiendo que hacia abajo de la lámpara la intensidad sea un poco superior a la media, esto es **40 Cd** ¿a qué distancia de la lámpara podré colocarme con un libro para poderlo leer con una iluminación aceptable de **50 Lx**?

Respuesta 2: No puedo colocarme justo debajo de la lámpara porque proyectaría la sombra de mi cabeza sobre el papel, así que me pondré hacia un lado, con lo cual $\alpha=30^\circ$. Así resultará $E=I_a \cdot \cos(\alpha)/r^2$, pero $I_{30^\circ} < I_{máx}$, y entonces tomaré $I_{30^\circ}=35$ Cd. Entonces $r^2=I_{30^\circ} \cdot \cos(\alpha)/E$ o sea $r^2=35 \cdot \cos(30^\circ)/50$ de donde $r^2=35 \cdot 0,866/50=0,61$, resultando $r=0,78$ m

Consideraciones: Colocándole a la lámpara una pantalla podremos evitar que el flujo hacia arriba se pierda. Supongamos que con este medio se puede tener un flujo útil de un **50%** más, esto es:

$1,5 \times 430=645$ Lm. En esas condiciones $I_{30^\circ}=1,5 \times 35=52,5$ Cd y de tal manera será $r^2=1,5 \times 0,61$ de donde $r=0,95$ m (la lámpara se podrá alejar unos 15 cm)

O bien, dejándola donde está, se obtendrá una iluminación **1,5** veces mayor, de **75 Lx**, que permite leer más cómodamente.



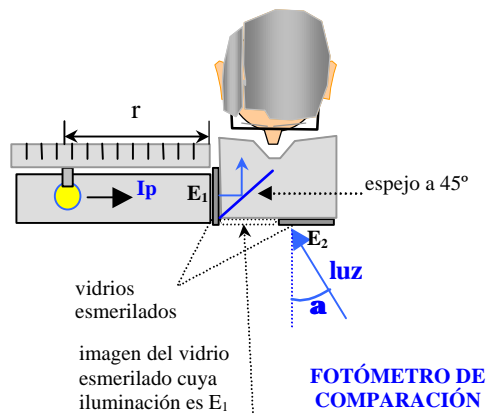
Variación de la iluminación con la distancia

La ley de la inversa del cuadrado de la distancia vale solamente para luminarias que emiten según un sólido fotométrico divergente en todos los sentidos

(en ancho y en alto, por decirlo de alguna manera), por ejemplo una pirámide o un cono. Si el sólido tiene límites paralelos en algún sentido (por ejemplo en alto), el flujo irá distribuyéndose en superficies proporcionales a la distancia a la fuente (no al cuadrado). Si, por último, el sólido fotométrico tiene todas sus caras paralelas (un prisma o un cilindro), como en el caso de un faro que emite rayos paralelos, la iluminación no variará con la distancia sino que se mantendrá constante⁴. Puede incluso imaginarse una luminaria que emita un haz convergente, lo que producirá hasta el cruce de los rayos una iluminación que aumenta con la distancia. Si la convergencia es perfecta, como en el caso de un espejo elíptico que concentra los rayos proveniente de uno de sus focos en el otro, la iluminación en el foco será igual a la que tendría a distancia nula de la fuente⁵.

Medida de la Iluminación

El método más preciso es el de **comparación**. Es fácil determinar la igualdad de iluminación entre dos superficies adyacentes del mismo color y textura, por ejemplo dos vidrios esmerilados. Uno de ellos recibe la iluminación E_2 que se trata de medir, bajo el ángulo α con respecto a la normal. El otro vidrio de referencia recibe la iluminación E_1 de una fuente patrón de intensidad I_p conocida. Esta lámpara se puede mover a lo



largo de un tubo cerrado pintado interiormente de negro mate, para que la superficie de referencia reciba exclusivamente la luz de la lámpara patrón. Ésta se desliza hasta la distancia r posición para la cual las dos superficies presenten igual iluminación. (El observador ve la imagen de la superficie de referencia reflejada en el espejo a 45° , junto a la superficie que recibe la iluminación E_2 . En tal caso es $E_1=E_2$ y como los rayos de la fuente patrón

⁴ Éste último caso es el de la luz solar, cuyos rayos son sensiblemente paralelos para distancias normales. En la cima del Everest el sol es mas fuerte que en la depresión del Mar Muerto, pero no a causa de la distancia de estos dos puntos al sol, que es prácticamente la misma, sino a causa del menor espesor de atmósfera que tiene que atravesar (unos 8000 metros).

⁵ Esta iluminación no es infinita, como se desprende de las fórmulas, porque éstas valen para fuentes puntuales fuera de las mismas. En realidad, dado que las fuentes puntuales son una entelequia y sólo existen fuentes extensas, la iluminación a distancia nula de la fuente equivale al brillo de la misma.

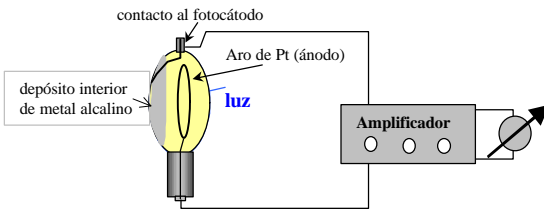
son perpendiculares a la superficie de referencia, se verificará que $E_2 = E_1 = I_p / r^2$. El método de comparación es difícil de aplicar con fuentes de distinto color.

Otro método para medir iluminación emplea **fotómetros absolutos**. Son aparatos que traducen iluminación en señal eléctrica (diferencia de potencial o corriente). Se calibran por comparación con fuentes de iluminación patrón.

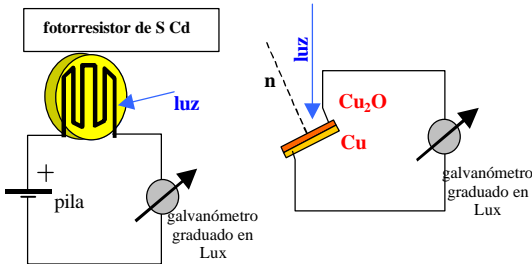
El de **fotocelda** emplea un dispositivo que aprovecha el **efecto fotoeléctrico**, esto es el de emisión de electrones por los metales alcalinos (por ejemplo potasio) iluminados por luz visible⁶. Los electrones arrancados con una determinada energía cinética forman una nube fuera del metal alcalino (que entonces queda con carga positiva). **La nube electrónica** es captada por un electrodo de un metal no emisor (por ejemplo platino), que adquiere carga negativa. El conjunto está encerrado en una ampolla de alto vacío. Los electrodos se conectan a una pila con el negativo sobre el metal alcalino (fotocátodo) y el positivo sobre el alambre de platino. La muy débil corriente que se establece cuando incide luz sobre el fotocátodo es amplifi-

cada convenientemente y medida con un galvanómetro.

Otro dispositivo es el que emplea el **efecto fotovoltaico**, equivalente al efecto fotoeléctrico pero en vez de saltar los electrones en el vacío, lo hacen en una interfase semiconductor de óxido/metal (por ejemplo óxido de cobre/cobre). Estos dispositivos fotovoltaicos (como los generadores solares) producen



Fotómetros absolutos



⁶Estos electrones son arrancados del seno del metal alcalino en un proceso cuántico: un fotón extrae un electrón si tiene suficiente energía cinética como para vencer la energía potencial que lo retiene al metal (potencial de extracción); de lo contrario sólo produce calor. Esto explica que no haya emisión alguna por debajo de cierta frecuencia, que depende del potencial de extracción propio del metal.

una señal muy potente que no necesita posterior amplificación.

También se usan **fotorresistores**, contruidos con sustancias que, como el **sulfuro de cadmio**, aumentan su conductividad eléctrica con la iluminación (incidencia de fotones).

La **respuesta de los fotómetros absolutos** depende del color, además de la intensidad. (Véase nota ⁽⁴⁾ al pie). A diferencia de nuestra vista que tiene alta sensibilidad al amarillo, los elementos fotoemisores, que emiten en base a transferencia de energía entre fotón y electrón, tienen mayor sensibilidad a los fotones más energéticos, o sea de mayor frecuencia⁷. Esto obliga a intercalar **filtros correctores**, que mengüen los tonos azules a favor de los de menor frecuencia.

Rendimiento de las luminarias

Se llama rendimiento de una luminaria a la razón entre **flujo total emitido** y **potencia total consumida**. Por ejemplo, una lámpara eléctrica incandescente de **40W**, **220V** emite un flujo de **430 Lm**, y por lo tanto su rendimiento es **430/40=10,75 Lm/W**. Un tubo de luz fluorescente de **36 W** emite un flujo de **2200 Lm**, y tiene por lo tanto un rendimiento mucho mayor, de **61 Lm/watt**. El mayor rendimiento de un tubo fluorescente frente a una lámpara de incandescencia radica en que el primero emite mucho menos rayos calóricos (invisibles) que ésta.

Una **lámpara incandescente es una fuente térmica**, que emite radiación proveniente de la agitación molecular estadística, cuya medida macroscópica es la temperatura del filamento. El **tubo fluorescente** genera **rayos ultravioleta** (invisibles) por radiación atómica (no térmica) del **vapor de mercurio** a baja presión que lo llena. Esa radiación ultravioleta excita la fluorescencia (radiación fría visible) de compuestos fosforados que recubren el interior del tubo.

Por una razón que se verá al estudiar la radiación térmica, una fuente térmica aumenta su **rendimiento lumínico** con la temperatura de trabajo: por ejemplo se usa en norteamérica alimentar algunas instalaciones de **lámparas de incandescencia** con mayor tensión que la nominal (por ejemplo 250 volt en vez de los 220 normalizados). Como resultado las lámparas trabajan a mayor temperatura produciendo individualmente un mayor flujo luminoso, lo cual permite usar menos unidades para el mismo propósito. Se ahorra energía y se abaratan las instalaciones. La vida media de las lámparas es menor, y hay que reponerlas más seguido (mayor costo de

⁷ La energía E de un fotón es proporcional a la frecuencia ν de la radiación asociada. $E=h \cdot \nu$ (h es la constante de Planck)

mantenimiento y reposición). Sin embargo el ahorro de energía compensa con creces el costo de reposición.

RENDIMIENTO DE ALGUNAS FUENTES DE LUZ en Lm/W

Lámpara incandescente común	12
Lámpara de cuarzo-halógeno incandescente	18
Lámpara de gas de mercurio alta presión	52
Tubo fluorescente	60
Lámpara de vapor de sodio de alta presión	81
Lámpara de vapor de sodio de baja presión	130

Problema de aplicación:

Anteproyecto de iluminación de una playa de estacionamiento de **100x100** metros al aire libre, en la que debe existir una iluminación mínima de **20 Lx**. Se dispone de lámparas de mercurio de alta presión que emiten un flujo total de **20000 Lm** consumiendo una potencia de **400 W c/u**.

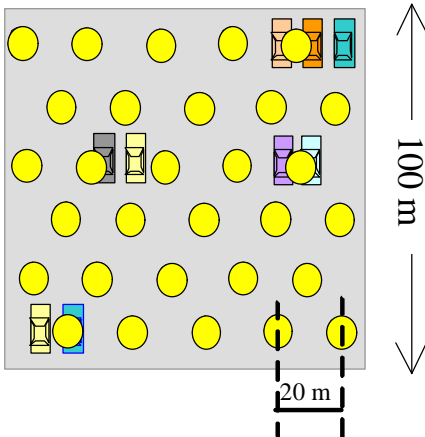
Solución:

Los artefactos de lámparas producen sobre el suelo una iluminación variable entre un máximo y un mínimo. Con muchos artefactos dispuestos apropiadamente se reduce este efecto. Sin embargo es razonable suponer en este caso que para lograr una iluminación mínima de **20 Lx** se deban hacer los cálculos con una iluminación promedio dos a tres veces mayor, pongamos unos **50 Lx**

El flujo total que se necesita sobre la superficie **S** de la playa (**Fu flujo útil**) es igual a dicha superficie multiplicado por el nivel **E** de iluminación promedio, suponiendo que los rayos llegan perpendicularmente al suelo.

Así es **$Fu = E \cdot S = 50 \text{ Lx} \cdot 10000 \text{ m}^2 = 500000 \text{ Lm}$** .

Ahora bien, consideremos que las lámparas están montadas en artefactos que canalizan los rayos hacia el suelo, absorbiendo un 10% del flujo (en el vidrio y en el



espejo del artefacto). Además de esta merma del 10% en el aprovechamiento de la luz, se debe considerar que los artefactos perimetrales envían parte de su flujo fuera de los límites de la playa, que supondremos sin paredes laterales. Este efecto es particularmente importante en superficies de gran relación perímetro/área (rectángulos alargados), que no es el caso de nuestra playa cuadrada. Por ahora no tendremos en cuenta esta cuestión, sobre la que volveremos una vez calculados el número y distribución de luminarias.

Entonces, en concepto de pérdidas, en cada artefacto (de una lámpara) se pierde $20000 \times 0,1 = 2000 \text{ Lm}$, con lo que el flujo emitido por cada luminaria que efectivamente llega al suelo es

$$F_{c/u} = 20000 - 2000 = 18000 \text{ Lm}$$

Lo anterior equivale a decir que sólo el **90%** de la luz producida es emitida realmente por el artefacto. El **10%** es absorbido por los medios refringentes y reflectores.

La cantidad de artefactos necesarios resulta así

$$F_u / F_{c/u} = 500000 / 18000 = 27,78$$

Se propone instalar **30** artefactos con el arreglo de la figura. La distancia entre artefactos es de aproximadamente **20 m**.

Con esta disposición, la cantidad de artefactos sobre el perímetro de la playa, cuyo flujo cae parcialmente fuera del recinto, resulta ser de **14** sobre un total de **30** artefactos

Estimando que sólo el **60%** del flujo emitido por esos **14** artefactos cae dentro de los límites de la playa, la playa recibirá entonces un flujo real de :

$$14 \times 18000 \times 0,6 + 16 \times 18000 = 18000 \times 24,4 = 439200 \text{ Lm}, \text{ lo que arroja una iluminación media de:}$$

$$439200 / 10000 = 44 \text{ Lx}, \text{ es decir un poco menos de lo calculado inicialmente.}$$

El consumo de potencia eléctrica para toda la instalación de alumbrado resulta:

$$30 \text{ artefactos} \times 400 \text{ W} = 12000 \text{ W}$$

RADIACIÓN TÉRMICA

Se llama **radiación térmica** a la energía electromagnética emitida por los cuerpos a causa de su temperatura⁸. Como se sabe, **calor y luz** son partes del **espectro electromagnético**, que va desde las ondas largas de radio a las muy cortas **radiaciones gamma**, pasando por las ondas **infrarrojas**, las **luminosas** y las **ultravioleta**.

Los cuerpos cuya temperatura va desde **100 a 5000°C** radian principalmente en la zona del infrarrojo, el visible y algo en el ultravioleta.

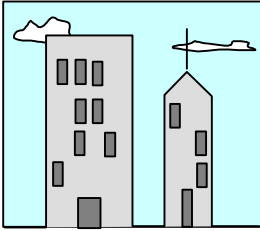
Existe una relación entre el **color aparente** de la radiación emitida y la **temperatura** de los cuerpos emisores.

Temperatura en °C	Color de la luz	Ejemplo
<500	infrarrojo	ceniza caliente
500	rojo oscuro	rescoldo
600	rojo	estufa de cuarzo
700	rojo claro	carbón bien encendido
800	anaranjado	carbón en un hogar
900	anaranjado brillante	carbón en la fragua
1000	amarillo	hierro antes de fundir
1500	amarillo brillante	hierro fundido
2500	blanco amarillento	filamento de lámpara
3000	blanco	flash fotográfico
5000	blanco solar	luz solar
7000	blanco azulado	luz de la estrella Sirio

No todos los cuerpos radian de la misma manera. Los cuerpos opacos de aspecto negro, como el **hollín** o el carbón de leña, son los que más absorben cuando están fríos. Por eso aparecen negros: Absorben toda la luz que incide sobre ellos, reflejando nada o muy poco. Examinando la superficie de un trozo de **carbón** o de hollín al microscopio observamos que está formada por pequeñas cavernas de **grafito**, que es brillante. Sin embargo la luz no se refleja en el carbón porque los rayos quedan aprisionados y se extinguen después de múltiples reflexiones en esos hoyos de grafito brillante.

⁸ No debe considerarse radiación térmica a la radiación atómica, generada por saltos electrónicos discretos, ni a la fosforescencia y fluorescencia. Estos tipos de energía radiante (luz fría, como la de los tubos fluorescentes) no provienen de la agitación térmica estadística de las moléculas, y producen espectros discontinuos de rayas o de bandas en vez de los espectros continuos de los cuerpos calientes.

Por ese mismo motivo, una pequeña ventana en una cavidad fría se presenta siempre oscura desde afuera, como las ventanas de los edificios durante el día. Aunque el interior de las habitaciones estén iluminadas por la luz que entra por esas ventanas y no sean precisamente oscuras, aparecen así porque los rayos que entran por la ventana estrecha difícilmente salen de la gran cavidad que hay detrás, en cuyas paredes se irán absorbiendo.



De día, los vanos abiertos de los edificios aparecen negros. El agujero (no pasante) en un bloque de hierro al rojo es más brillante que el propio bloque

Los cuerpos cuya superficie es oscura o negra también son los que más radian cuando están calientes: Un trozo de carbón encendido tiene un rojo más vivo que un trozo de hierro metido en él, a pesar de estar ambos a la misma temperatura. Una cavidad en un trozo de hierro al rojo aparece más brillante que el resto de la pieza. Asimismo, las superficies que

menos absorben cuando están frías son las brillantes o espejadas y también son las que menos radian cuando están calientes⁹. Un automóvil claro al sol se calienta menos que uno oscuro, pero también se enfría más lentamente cuando cae el sol.

Para explicar estos hechos podemos imaginar que la materia radia porque sus átomos o moléculas, que tienen cargas eléctricas, vibran a causa de la **agitación térmica**. Una carga eléctrica oscilante emite **radiación electromagnética**: es una pequeña antena de un **emisor monocromático** (de una sola frecuencia). Si cada partícula de la materia radiante emite en una sola frecuencia, se puede imaginar que la radiación policromática de un cuerpo es el **resultado estadístico** de toda esta infinidad de pequeños emisores elementales cada uno con frecuencia propia.

La radiación que emiten los osciladores que tapizan las paredes interiores de una cavidad cerrada sufre una suerte de "**homogeneización**", ya que se establece un equilibrio entre radiación emitida y absorbida para cada

⁹ Una plancha eléctrica, que presenta una superficie pulida, radia muy poco aunque esté muy caliente: la planchadora debe humedecerse el dedo con saliva y tocarla para saber si está a punto. En cambio sentimos la radiación sobre la mano al acercarla a la plancha negra de los bifés, que está sobre la hornalla a la misma temperatura.

color (o intervalo de longitud de onda). El interior de la cavidad está surcada de una **radiación homogénea e isótropa**¹⁰ cuya composición en color responderá a la **cantidad de osciladores** que aportan cada color en particular.

Si practicamos una abertura muy pequeña en esa cavidad, saldrá y entrará radiación en una medida que no afectará el equilibrio interno de la misma: el observador verá la abertura como un agujero. Negro si el interior está frío, de color si está caliente. Se comprende así que una abertura en una cavidad sea equivalente a la superficie de un **cuerpo negro** y sea mejor emisor o receptor de radiación que cualquier otra superficie no cerrada, que por esa condición no favorezca la homogeneización de la radiación.

Generalmente las superficies de los cuerpos comunes no absorben totalmente la radiación que incide sobre ellas y por lo tanto no son absolutamente negras aunque a veces puedan aparecer así a la vista porque absorben los rayos visibles, pero reflejan o transmiten otras radiaciones invisibles. Se las denomina genéricamente superficies de **“cuerpo gris”**. Por las razones ya apuntadas una superficie de “cuerpo gris” absorberá y emitirá menos que una superficie de cuerpo negro. La relación entre esa menor cantidad de radiación absorbida o emitida según los casos, frente a la de un cuerpo negro en las mismas condiciones, se llama **emisividad** del cuerpo gris, y vale menos que la unidad. La emisividad de un espejo perfecto es nula.

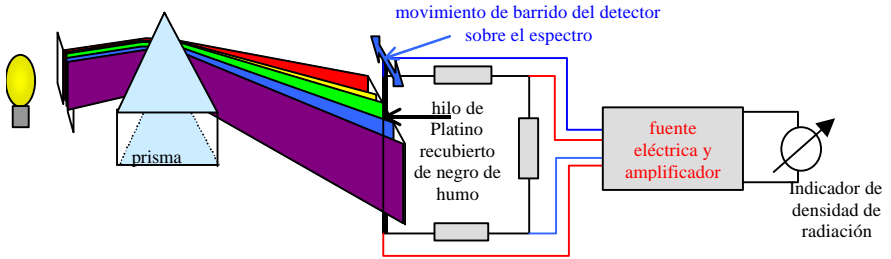
El estudio experimental de la distribución de la energía radiante de los cuerpos a través del análisis de sus espectros, permite inferir datos sobre esa **“colonia de osciladores”** que la produce. En base a datos muy precisos sobre la distribución de energía espectral de los ópticos alemanes **Lummer y Prigsheim** en el siglo pasado, se elaboraron una serie de teorías que culminaron con la hipótesis formulada por Max Plank en 1900, a saber: que la luz y la radiación en general se emite por pequeños paquetes indivisibles en vez de un flujo continuo de ondas.

He aquí los hechos:

El espectro de la radiación emitida, que se obtiene haciendo pasar la luz por un prisma o red de difracción, presenta una apertura de la radiación

¹⁰ Homogéneo se aplica a las cosas cuyas propiedades son iguales en todos sus puntos, o sea que son independientes de su situación. Por ejemplo es homogénea una mezcla de pintura y color cuando el tono es el mismo en toda la masa. Isótropo se aplica a las cosas cuyas propiedades son independientes de la dirección en el espacio, por ejemplo no es isótropo la constitución de un tejido con fibras en una dirección preferente.

según su longitud de onda o frecuencia. Si esa apertura o descomposición



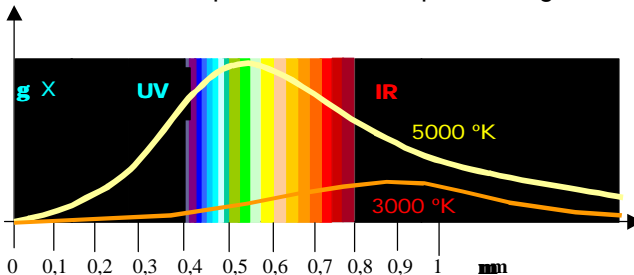
de la luz se realiza con un prisma, su desviación será aproximadamente proporcional a la frecuencia ν de la radiación considerada. Si se usa una red de difracción¹¹, la desviación es proporcional a la longitud de onda $\lambda = c/\nu$

Se comprende que la intensidad de cada color en un espectro será proporcional a la cantidad de osciladores que lo emitan, o sea que la densidad de energía en el espectro representa la distribución de la cantidad de osciladores que emiten la correspondiente longitud de onda, característica de ese color.

La densidad de energía espectral

se estudia paseando un pequeño detector de radiación (**radiómetro**) sobre la proyección del espectro del cuerpo emisor.

Un detector adecuado es un alambre recubierto de **hollín**¹², que absorbe toda la radiación incidente, como ya se explicó. Toda la energía captada por el alambre negro se transforma en calor y la temperatura del alambre aumenta proporcionalmente al calor recibido, o sea a la energía de la pequeña banda del espectro abarcado por el delgado hilo. Se sabe que la



resistencia eléctrica de los metales es proporcional a su temperatura, así que midiendo la resistencia del alambre detector, colocándolo en una

¹¹ Lo ideal es una red de reflexión, que no absorbe radiación alguna.

¹² Se pasa el alambre frío por una llama reductora, depositándose el carbono sin quemar sobre el mismo.

de las ramas de un puente de Wheatstone, se sabrá su temperatura y por ende la intensidad específica para ese color.

Si representamos en ordenadas la indicación del aparato y en abscisas la longitud de onda, obtendremos una **curva de distribución** acampanada. En la figura, la curva amarilla corresponde a un cuerpo cuya superficie tiene aproximadamente **5000°K** (como el sol) y la curva anaranjada a uno de **3000°K** (como el de un flash fotográfico o una lámpara halógena).

En la época anterior a **Planck**, los físicos **Stephan**, **Wien**, **Boltzmann** y otros, estudiando atentamente las curvas correspondientes a cuerpos negros a diferentes temperaturas, establecieron las siguientes leyes empíricas:

LEYES DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

- La **potencia electromagnética total** de radiación emitida por la **superficie del cuerpo negro** es proporcional a la **cuarta potencia** de su temperatura absoluta. (Ley de Stephan, de la cuarta potencia). Se demuestra matemáticamente que esa potencia está medida por el área encerrada entre la curva y el eje de abscisas. Esa ley se expresa por la fórmula $P[W]=S[m^2].s.T^4$, donde **S** es la superficie radiante en m^2 , **T** su temperatura absoluta superficial y **s** una constante que vale $s=5,86 \times 10^{-8} [W/m^2/^\circ K^4]$
- El **máximo de la curva** se encuentra en una longitud de onda que se va corriendo hacia longitudes de onda cada vez más cortas a medida que la temperatura crece (notemos que a 3000°K está en 0,95 μm y a 5000°K está a 0,55 μm). La relación matemática encontrada es que esa longitud de onda $\lambda_{m\acute{a}x}$, para la cual corresponde el máximo de intensidad específica, es **inversamente proporcional** a la temperatura absoluta **T** de la superficie radiante. (Ley del **desplazamiento** del máximo, de Wien, que se expresa $I_{m\acute{a}x}=b/T$, para un valor de la constante $b=2,9 \times 10^3 [mm.^\circ K]$)
- La **máxima intensidad específica** es proporcional a la quinta potencia de la temperatura absoluta. Es decir que si la ordenada máxima a 3000°K vale 1, la ordenada máxima a 5000°K valdrá $(5000/3000)^5=12,8$ veces más. (Ley de la **quinta potencia** de Wien).

PRESIÓN DE RADIACIÓN

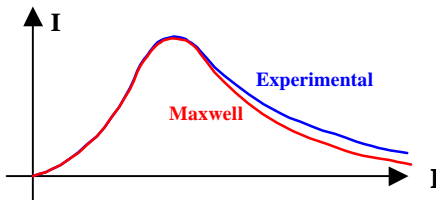
La luz produce una **presión** sobre las superficies en las que incide (siempre que éstas no sean transparentes), de la misma forma que un chorro de agua ejerce presión sobre la pared contra la que choca. El origen de la fuerza se puede atribuir a la variación de la cantidad de movimiento de las partículas luminosas que vienen con velocidad **c** y se estrellan contra el receptor.

Se demuestra en electricidad que la **energía por unidad de volumen** de un campo electromagnético vale numéricamente lo mismo que la **presión de radiación** que ejerce sobre una superficie que la absorba totalmente. Así un haz de luz de potencia **P** que incide sobre una superficie **S** durante un tiempo **t** a la velocidad **c**, ocupa un volumen **S.c.t** y tiene una energía por unidad de volumen igual a $P.t/(S.c.t)=P/S/c$, y este es precisamente el valor de la presión de radiación. La fuerza que ejerce sobre el receptor es $F=P/c$ ⁽¹³⁾

El mismo Wien, que conocía que la radiación ejercía **presión** sobre los cuerpos, asimiló una **cavidad radiante** a un globo lleno de gas caliente, e imaginó como podría evolucionar en un **ciclo de Carnot**. Mezclando el **segundo principio de la termodinámica** con la **presión de radiación**, aparecen naturalmente las leyes de Stephan (de la cuarta potencia), la del desplazamiento y la de la quinta potencia.

También por analogía formal, la **curva acampanada** de radiación muy similar a la **distribución de energía cinética** de las moléculas de un gas, le sugirió que se trataba de un fenómeno de distribución de energía de muchas partículas, similar a la estudiada a fines del siglo pasado por el inglés **Maxwell** y el austríaco **Boltzmann**, aplicable a **gases ideales (Teoría cinética de los gases)**.

Wien y otros físicos de la época pensaron que las energías de la colección de osciladores que tapizaban las paredes de un cuerpo emisor podrían



tener una distribución de energía similar a la de un **gas**, y aplicándoles la ley de **distribución de Maxwell** llegaron nuevamente a la ley de la cuarta potencia, la del desplazamiento y la de la quinta potencia.

¹³ Si la superficie en la que inciden las ondas es un espejo, las ondas cambian de velocidad de **c** a **-c**, siendo doble la variación de la cantidad de movimiento con respecto a la absorción en un cuerpo negro. Resulta así que la presión de radiación sobre un espejo perfecto vale $2P/c$

Sin embargo la **curva de Maxwell**, que se ajusta bastante bien a la curva experimental para longitudes de onda pequeñas, se aparta de ella para longitudes de onda grandes: sus ordenadas, que representan la intensidad espectral, son menores que la experimental. Para “curar” ese defecto, **Planck** modificó la fórmula de **Maxwell** restando la unidad en el denominador: ese **uno** no tiene peso en el valor del denominador cuando el exponente $hc/(k\lambda T)$ es grande, o sea cuando λ es pequeña. En cambio, el uno toma importancia para λ grandes, reduciendo el valor del denominador y por lo tanto aumentando el valor de U .

Esta inocente corrección, que es casi rutinaria para un matemático acostumbrado a ajustar curvas, tiene un sentido físico muy profundo pues permite el desarrollo de la fórmula en una serie de potencias de la energía básica hc/λ .

Veamos....

La **ley de Maxwell**, derivada de la de los gases moleculares es:

$$U = \frac{h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}}}$$

La **ley de distribución** de la densidad de potencia, retocada por Planck,

$$U = \frac{h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

resulta:

La densidad de potencia significa “la potencia por unidad de superficie para un color del espectro correspondiente a la longitud de onda λ ”¹⁴

- U es la densidad de potencia para la longitud de onda λ [m], expresada en $[W/m^2/m]$
- λ es la longitud de onda del color o el lugar del espectro elegido (en m)
- c es la velocidad de la luz en m/s ($c=3 \cdot 10^8$ m/s)
- e es un número irracional, base de los logaritmos naturales ($e=2,71828\dots$)
- T es la temperatura absoluta del cuerpo negro
- k es la constante universal de los gases para una molécula, es decir
- $k=R/N_a=8,3J^\circ K/mol/6,02 \cdot 10^{23}$ (se la conoce como “constante de Boltzmann”)

¹⁴ El color en este caso es una radiación de color puro, representado por un intervalo de longitud de onda infinitésimo.

- h es la constante de Planck, que salió experimentalmente de las mediciones de radiación al aplicar la fórmula de los gases. $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Para que aparezca clara la suma de una serie geométrica de razón r , de la forma $1/(1-r)$, la fórmula anterior puede ponerse bajo la forma $U = [hm^2/\pi^3 \cdot e^{-h\nu/kT}] [1/1 - e^{-h\nu/kT}]$

El primer corchete es la fórmula de distribución de la energía del tipo de Maxwell, válida para moléculas gaseosas.

El segundo corchete es la suma de una **serie geométrica** de razón $e^{-h\nu/kT}$ es decir

$$1 + e^{-h\nu/kT} + e^{-2h\nu/kT} + e^{-3h\nu/kT} + \dots$$

En todas las fórmulas de distribución, las energías de las partículas (moléculas, osciladores, o la partícula de que se trate) van en el numerador del exponente: en el caso de la radiación estas energías valen pues **$h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$,...**

El producto de ambos corchetes da una suma de distribuciones del tipo **Maxwell**, donde no tienen cabida las energías que no sean múltiplos de un valor fundamental **$h\nu$**

Fotones

La fórmula de **Planck** revela así que la potencia específica de radiación U se puede expresar en una suma de **términos de energías** que son múltiplos de una cantidad fundamental **$h\nu$**

Resulta apropiado entonces admitir que esa emisión escalonada proviene de los aportes individuales de los **radiadores elementales**, que por lo tanto tampoco pueden variar su energía en forma continua.

Si aplicamos las **leyes estadísticas de los gases** de **Maxwell** a la colección de osciladores elementales que conforman la superficie radiante, aparece que cada oscilador elemental puede radiar solamente una energía múltiplo de una cantidad básica o "**cuanto**" igual a la constante de Planck multiplicada por la frecuencia de oscilación: Así será que **$E_{osc} = n \cdot h\nu$** , siendo **$n = 1, 2, 3, \dots$** (un número entero).

Por otra parte, la interpretación cuántica del **efecto fotoeléctrico** dada por Einstein (véase lo dicho al ocuparnos de los fotómetros absolutos), exige que también la **absorción de luz se efectúe en forma discontinua**. Es

decir que se emiten y se reciben gránulos de energía radiante. Parece lógico entonces admitir que la luz que viaja de la fuente al receptor mantiene en el camino esa identidad granular o “cuántica”.

Estos **cuantos de luz** son la reencarnación del **corpúsculo luminoso** de Newton, ahora con característica ondulatoria. **Einstein** los bautizó “**fotones**”. Se puede imaginar a los fotones como partículas con una longitud de onda asociada, o bien como trenes discretos de ondas. Son la menor cantidad de energía radiante que se puede crear, mandar y recibir en una determinada frecuencia.

A los **fotones en una cavidad radiante** se le aplica la **fórmula distribución de Planck** y su conjunto puede ser entendido como un “gas” de partículas cuyas propiedades son algo diferentes a las de las moléculas: tienen todos la misma velocidad (la de la luz), poseen una frecuencia asociada, que es la que se distribuye estadísticamente; su número no es constante, como ocurre en un botellón de gas, sino que depende de la temperatura de la cavidad.

Problemas

1) Presión de radiación:

Si un receptor de radiación de superficie S (una placa solar) recibe una potencia radiante W (**Watt**), está sujeto a una fuerza $F=W/c$, y sobre él actúa una presión de radiación de $P=F/S=W/c/S$

¿Qué fuerza actúa sobre una placa solar de 6 m^2 de superficie, que absorbe totalmente una potencia específica de 1000 W/m^2 ?

Respuesta: $F=W/c=6000 \text{ N.m/s}/3.10^8 \text{ m/s}=2.10^{-5} \text{ N}$ (2 miligramos, fuerza capaz de inclinar los platillos de una balanza de precisión)

2) Ley de Stephan

¿Qué potencia eléctrica se necesita para mantener un filamento de tungsteno de una pequeña lamparita de linterna a 2000°C ?. Las dimensiones del filamento son $d=0,1 \text{ mm}$ de diámetro y $l=30 \text{ mm}$ de longitud. (Como se sabe, el filamento está dentro de una ampolla de vidrio al vacío). Dato adicional: el tungsteno es un cuerpo gris de emisividad $a=0,3$

Respuesta: si consideramos que toda la energía se disipa por radiación, debemos igualar la potencia eléctrica a la radiante. La superficie S del alambre es la que radiará la energía

Entonces $S=\pi \cdot d \cdot l=3,14 \times 0,1 \times 30=9,4 \text{ mm}^2$

La temperatura absoluta del filamento es $T=2000+273=2273^\circ\text{K}$ y la potencia radiante vale:

$$P = s \cdot S \cdot a \cdot T^4 = 5,86 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{/}^\circ\text{K}^4] \cdot 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 2273^4 = 14,7 \text{ W}$$

Si quisiéramos obtener una luz más brillante, podríamos aumentar la corriente que circula por el filamento y calentarlo hasta 3000°C, en cuyo caso la potencia aumentaría dramáticamente, ya que depende de la cuarta potencia de la temperatura absoluta:

$$P = s \cdot S \cdot a \cdot T^4 = 5,86 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{/}^\circ\text{K}^4] \cdot 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 3273^4 = 63,2 \text{ W}$$

3) Ley del desplazamiento

a) ¿Qué temperatura tiene un horno cerrado cuya radiación presenta un máximo en una longitud de onda de 3 μm?

$$\text{Respuesta: } T = b/\lambda_{\text{máx}} = 2,9 \times 10^3 \text{ [mm} \cdot \text{°K]} / 3 \text{ mm} = 966^\circ\text{K} = 694^\circ\text{C}$$

b) ¿Qué temperatura tiene la superficie de una estrella cuyo espectro tiene un máximo en el azul, para $\lambda = 0,45 \mu\text{m}$

$$\text{Respuesta: } T = b/\lambda_{\text{máx}} = 2,9 \times 10^3 \text{ [mm} \cdot \text{°K]} / 0,45 \text{ mm} = 6444^\circ\text{K} = 6171^\circ\text{C}$$

4) Fotones

¿Cuántos fotones por segundo recibe un ojo normal bajo la iluminación umbral de 10^{-10} Lx ?

Supóngase radiación amarilla de sodio, cuya longitud de onda vale $\lambda = 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ con una frecuencia

$$\nu = c/\lambda = 3 \cdot 10^8 \text{ [m/s]} / 0,59 \cdot 10^{-6} \text{ [m]} = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

La energía del fotón será:

$$e = h \cdot \nu = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 5,1 \cdot 10^{14} \text{ (1/s)} = 3,38 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Respuesta: Una iluminación de 10^{-10} Lx equivale a la que produce una lámpara de sodio de baja presión que emite **4650 Lm** y consume **35 W**, con una $I_{\text{me}} = 4650/4\pi = 370 \text{ Cd}$ a una distancia r tal que $E = I_{\text{me}}/r^2$, de donde $r^2 = I_{\text{me}}/E = 370/10^{-10} = 3,7 \cdot 10^{12}$ resultando así $r = 1923 \text{ Km} \dots$

A esa distancia, los **35 W** de la lámpara se distribuyen en una superficie $4\pi r^2 = 4,65 \cdot 10^{13} \text{ m}^2$, lo que nos da una densidad de potencia de $35/4,65 \cdot 10^{13} \text{ m}^2 = 7,53 \cdot 10^{-13} \text{ W/m}^2$

Considerando que la pupila del ojo bajo luz débil tiene una superficie de 10 mm^2 , recibirá una potencia cien mil veces menor, o sea $7,53 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2$, y esto equivale a $7,53 \cdot 10^{-18} / 3,38 \cdot 10^{-19} = 22 \text{ fotones por segundo}$

INTERACCIÓN ENTRE RADIACIÓN Y MATERIA

La radiación interactúa con la materia principalmente de dos maneras: **dispersión** y **absorción**.

En el proceso de **dispersión** los fotones chocan con los átomos de la materia en forma elástica y salen en determinada dirección, según las leyes del choque elástico de Newton¹⁵. La reflexión de la luz sobre un espejo puede entenderse como una dispersión ordenada.

La **absorción** de los fotones puede ser parcial o total. Si es parcial, los fotones que no son absorbidos se dispersan. Si es total, no hay radiación dispersa (cuerpo negro). En el caso de la absorción, la energía de los fotones generalmente se transforma en calor en el seno del medio absorbente.

Hay procesos en los que se absorben fotones de una longitud de onda y se reemiten fotones de otra longitud de onda siempre mayor a la primera. Son ejemplos de este fenómeno **la fluorescencia y la fosforescencia**.

En algunas oportunidades una radiación muy energética, como la de los **rayos gamma**, arranca electrones de la materia, los que salen disparados a enormes velocidades. El fotón gamma pierde energía en el choque y se transforma en un fotón de menor frecuencia, por ejemplo un rayo X. Dichas interacciones se conocen bajo el nombre de **Efecto Compton**, en honor a su descubridor.

A su paso por un medio absorbente la radiación va perdiendo intensidad, y si consideramos que la amplitud del haz es proporcional al número de fotones que lo componen, el proceso de absorción a través del medio corresponde a un flujo de fotones que va disminuyendo por los que quedan retenidos por la materia.

Amplificación de la radiación

Puede considerarse que la amplificación de una radiación es un proceso formalmente inverso al de la absorción. En la amplificación se van agre-

¹⁵ En cualquier tipo de choque (elástico o inelástico) se conserva la cantidad de movimiento del sistema antes y después del choque. Así se cumple que la suma del producto de las masas de los cuerpos intervinientes por sus respectivas velocidades se mantiene constante antes y después de la interacción.

gando fotones a lo largo del camino del haz. Ese agregado corresponde desde el punto de vista energético, a la entrega de potencia externa al haz, manteniendo la frecuencia. En radiotecnica se practican procesos de amplificación de señales eléctricas, manteniendo su forma, mediante circuitos con válvulas o transistores que agregan esa potencia a las corrientes eléctricas que se terminan radiando en forma de ondas.

Sin embargo, la amplificación directa del haz de ondas una vez emitidas es también posible, haciendo atravesar las mismas por un medio con propiedades de **absorción negativa**. Por supuesto que un medio normal, un vidrio o un gas, no amplifica sino que absorbe. Sus átomos se van cargando de energía vibratoria a costa de la del haz. Pero esa energía es desordenada y termina en radiación térmica. Pero si el medio normal se acondiciona convenientemente cargándolo de energía ordenada (no energía térmica, por supuesto), podría invertirse la transferencia desde la materia a la radiación, inyectando fotones de la misma frecuencia en el haz y logrando la amplificación deseada. La carga de energía ordenada se realiza con una radiación exterior de energía E_2 que eleva a los átomos del medio absorbente desde el nivel normal no excitado E_0 hasta un estado electrónico de energía más alto E_1 y menor que E_2 . Este proceso se da en llamar **“inversión del medio por bombeo de energía”** y **“radiación de bombeo”** a la radiación con la que se lleva a cabo, aludiendo a la elevación de la energía como si fuera un fluido mediante una bomba. Lógicamente, la radiación de bombeo debe ser siempre de una energía superior a la que se pretende llegar, para que la transferencia sea posible.

Luz coherente

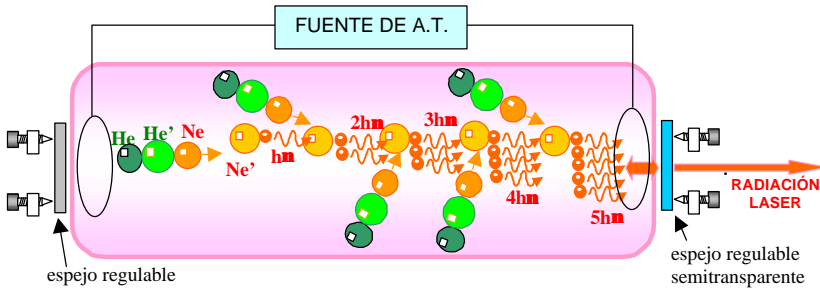
Los átomos liberan energía en forma de fotones de una frecuencia ν tal que $\nu = (E_1 - E_0)/h$, al pasar del estado excitado al estado normal. Este proceso ocurre con una cierta probabilidad cuando otro fotón de esa frecuencia alcanza al átomo y gatilla la emisión del fotón almacenado. Como consecuencia, los fotones que circulan por el medio van arrancando estadísticamente más fotones de la misma frecuencia a su paso por los átomos excitados. El resultado es el engrosamiento del flujo con una cantidad creciente de fotones que viajan todos juntos, en lo que podría llamarse un rayo de múltiple radiación en fase. Este tipo de rayo, de fotones de la misma frecuencia (monocromático) y con la misma fase (todos vibrando al unísono) se da en llamar **“rayo de luz coherente”**.

LÁSER

Un dispositivo que amplifique con este principio se llama **LÁSER**, sigla de Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation

Las fuentes de luz coherente LASER aprovechan este principio de amplificación, reinyectando la potencia de salida en la entrada para lograr que el sistema, de dimensiones apropiadas, oscile con una frecuencia propia de **resonancia** coincidente con la de la radiación atómica amplificada. Se drena una pequeña cantidad de esa radiación hacia afuera, en lo que constituye la emisión aprovechable de la fuente.

Un láser común es el de **helio neón**: un tubo conteniendo una mezcla apropiada de estos dos gases se excita mediante una corriente eléctrica. El paso de la co-



rriente eleva el nivel energético de los átomos de helio a un nivel excitado E_{He} , volviendo al nivel normal E_{0He} al emitir un fotón de frecuencia $\nu_{He} = E_{He} - E_{0He} / h$ (**luz verde, como la de los tubos de neón de los anuncios**). Alguno de esos fotones “verdes” interaccionan con los átomos de neón, elevándoles la energía a un estado excitado E_{Ne} . Se obtiene así una población de átomos de neón con un porcentaje elevado de átomos excitados (**población invertida**, según la jerga de los especialistas). Un átomo de helio excitado que pase espontáneamente al nivel normal, genera un fotón de frecuencia $\nu_{Ne} = E_{Ne} - E_{0Ne} / h$ (**luz rojo anaranjada del neón**). En un medio no excitado, este fotón “rojo” saldría del sistema como luz. Pero en una población invertida existe la probabilidad de que colisione con un átomo de neón excitado, del que arrancará otro fotón igual, que correrá junto a él en concordancia de fase. El proceso puede repetirse con este último fotón, y así sucesivamente a lo largo del camino recorrido por la radiación, obteniéndose una suma de fotones de igual frecuencia y todos juntos, es decir en fase. Como vimos este tipo de rayo monocromático múltiple se llama “luz coherente”. La potencia de ese rayo va aumentando con el camino recorrido, en este caso la longitud del tubo que contiene a los dos gases. Para que exista oscilación del sistema, debe reinyectarse radiación coherente y dimensionar el tubo para que resuene a esa frecuencia. Lo primero se logra mediante dos espejos colocados en cada extremo del tubo y perfectamente alineados con éste, que devuelvan gran parte de la radiación al sistema. La resonancia del tubo se logra ajustando la distancia entre los espejos a un número entero de longitudes de onda, para que se forme una **onda estacionaria**. Una pequeña parte de la luz se extrae del sistema haciendo a uno de los espejos ligeramente transparente.

Un dispositivo de luz **LASER** de **Helio-Neón** produce una radiación compuesta de dos longitudes de onda: una visible, de color rojo, de $\lambda=0,633 \text{ nm}$ y otra infrarroja de $\lambda=1,15 \text{ nm}$

Hay **láseres de estado sólido**, en los que la amplificación fotónica se realiza entre dos semiconductores, resonando la radiación entre dos superficies espejadas microscópicas. Generalmente se emplean conectados a una fibra óptica (un hilo de vidrio muy transparente) para transmitir información codificada por pulsos (luz-oscuridad).

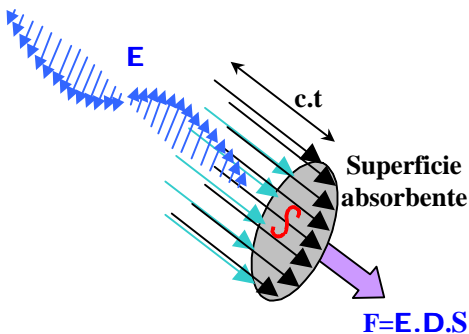
ATENCIÓN

La luz laser concentra un flujo luminoso considerable en un haz muy fino, cuya intensidad depende de la potencia del dispositivo. Los hay desde la exigua potencia de $4 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ (punteros señaladores de $\lambda=0,65 \mu\text{m}$) hasta los infrarrojos de miles de W (haces para cortar o soldar metales). Debe siempre tenerse mucha precaución en el manejo de las fuentes LASER, aún las de pequeña potencia, pues ésta se concentra en una superficie muy pequeña en la retina, pudiendo llegar a destruir las células sensibles de ésta.

Nunca dirigir punteros, aparatos de demostración o de laboratorio con luz LASER directamente hacia los ojos de las personas. Si se deben hacer experiencias en las que la dirección del haz no sea controlable, deben proveerse anteojos especiales a todas las personas presentes.

Equivalencia entre masa y energía

Vimos que la radiación en general y la luz en particular, ejercen **presión** sobre la materia. La electricidad explica este hecho a través de la interacción de una **onda electromagnética** y una superficie receptora **S**. La onda



de velocidad **c** tiene un valor de **campo eléctrico E** que crea sobre el receptor una **carga superficial D**. El producto **E.D** da el valor de la fuerza sobre la superficie **S**. Así entonces $F = E \cdot D \cdot S$.

Por otra parte sabemos que desde el punto de vista de la mecánica clásica, una fuerza se produce por la variación de la **cantidad de movimiento** en el tiempo para un sistema de masa **m** y velocidad **v**, es decir $F = D(mv) / Dt$

Tiene sentido suponer que la fuerza eléctrica se puede asimilar a una variación de la cantidad de movimiento de la luz, considerada como algo material de masa m que se mueve a la velocidad c . Esta cantidad de movimiento pasa a ser cero después de la interacción durante un tiempo t , suponiendo que la radiación se absorbe totalmente en el receptor. Así que la variación de esa cantidad de movimiento será $m.c/t$ en caso de absorción completa de la radiación.

Entonces pondremos $E.D.S=m.c/t$

En electromagnetismo se estudia que el producto $E.D$ es la energía E por unidad de volumen V de campo electromagnético. En este caso el **volumen** en cuestión tiene una base S y una altura $c.t$, así que resulta que $E.D=E/(S.c.t)$

De estas fórmulas resulta que $E/(S.c.t)=m.c/(S.t)$ y entonces $E=mc^2$

La fórmula anterior sale de equiparar los principios de la mecánica de Newton con el electromagnetismo clásico. Expresa una equivalencia entre una **masa asociada a la radiación** y la **energía radiante** que ella lleva.

La masa electromagnética

Los físicos de fines de siglo XIX reconocieron que una **carga eléctrica** pura q distribuida según una esfera de radio r , posee algo semejante a la **masa** cuando está en movimiento uniforme. En efecto, la **carga en movimiento** con velocidad v es una **corriente eléctrica** (corriente de convección) y como tal genera un **campo magnético** alrededor de ella. Si se calcula la energía E de ese campo magnético en todo el espacio de permeabilidad m que rodea a la carga en movimiento¹⁶, aparece que esa energía es proporcional al **cuadrado de la velocidad v** según la fórmula:

$$E = \frac{1}{2}[mq^2/(6.p.r)]v^2$$

Lo que figura entre corchetes se asimiló, por comparación con la fórmula que da la mecánica para la energía cinética $E_c=1/2.m.v^2$, a algo que **funciona como masa**. Se la llamó "**masa electromagnética**" correspondiente a una **carga en movimiento**. Reemplazando en la fórmula anterior el valor de la **carga del electrón $q=1,6 \times 10^{-19} C$** y el valor de su **masa $m=9.10^{-31} Kg$** , se obtiene para el vacío ($m=4.p.10^{-7}$) un valor del **radio del electrón $r_e=1,89 \times 10^{-15} m$** , lo que está de acuerdo con la teoría atómica.

¹⁶ Este cálculo se realiza suponiendo que la corriente $q.v/dx$ produce un campo magnético elemental ΔH dado por la ley de Biot-Savart (véase el capítulo correspondiente de electricidad). El campo posee una energía diferencial por unidad de volumen igual a $1/2 m \Delta H^2$, que integrada a todo el espacio que rodea la carga, desde r hasta infinito, produce la expresión dada.

Si se considera que el campo magnético se instala en el espacio en forma instantánea, la masa electromagnética es independiente de la velocidad de la carga, de acuerdo a la fórmula recién vista. En cambio, si se supone, como hizo **Lorentz** en su "teoría del electrón", que la velocidad con que se establece y propaga el campo es **la de la luz**, la masa electromagnética aparece **dependiente de la velocidad** de traslación de la carga. Esta dependencia se comprobó experimentalmente para electrones a grandes velocidades, según se explica luego.

De acuerdo a su Teoría de la Relatividad, que es un modelo eminentemente electromagnético de la física, Einstein postula que la equivalencia entre masa y energía es válida en forma absolutamente general: Cualquier fenómeno que implique **variación de masa**, debe estar acompañado por la correspondiente **variación de energía** de signo contrario. Así, los principios de conservación de la masa y de la energía, hasta ese momento separados e independientes, pasaron a formar parte de un principio de conservación único: el de la **masa-energía**.

El principio de conservación de masa-energía

Se comprueba este principio en las reacciones nucleares: por ejemplo en un proceso de fisión típico, un núcleo atómico de ${}_{92}\text{U}^{235}$ de masa $M=235 \text{ UMA}$ es impactado por un neutrón de baja energía cinética¹⁷ (${}_0\text{n}^1$) y se fragmenta en dos núcleos cuyas respectivas masas en reposo son $M1=98,7 \text{ UMA}$ (${}_{41}\text{Nb}^{99}$) y $M2=133,21 \text{ UMA}$ (${}_{51}\text{Sb}^{133}$) y en dos neutrones rápidos. Los neutrones tiene una masa en reposo igual a $1 \text{ UMA}=1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$.

La suma de la masa de los productos de la reacción en reposo es un poco menor que la de los que le dieron origen (masa del núcleo original más el neutrón que ofició de proyectil).

Así entonces $M+m > (M1+M2+2m)$. La diferencia de masa $\Delta M = M-M1-M2-2m = 235-98,59-133,21-3 = 0,2 \text{ UMA}$ aparece principalmente en forma de energía cinética E_c de los fragmentos¹⁸, que salen disparados con enorme velocidad, portando en total una energía cinética ΔE_c de acuerdo a la equivalencia dada, es decir $\Delta E_c = \Delta M \cdot c^2 = 0,2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

Problema: El reactor nuclear de la **central de Atucha** produce una energía térmica de $850 \cdot 10^6 \text{ Watt}$. ¿Qué cantidad de materia "consume" por año?

Respuesta: La energía en un año es de $850 \cdot 10^6 \text{ watt} \cdot (24 \cdot 60 \cdot 3600) \text{ seg/año} = 4,4 \cdot 10^{15} \text{ Joule}$, lo que equivale a una masa de $4,4 \cdot 10^{15} / c^2 = 0,049 \text{ Kg}$

Estos **49** gramos se transforman íntegramente en igual cantidad de energía eléctrica que la que aproximadamente se consume en nuestro país durante los tres meses de verano.

¹⁷ Los neutrones de alta energía tienen baja probabilidad de producir fisión.

¹⁸ En menor medida, aparece también como energía radiante (fotones gamma)

Variación de la masa con la velocidad¹⁹

Partiendo de la fórmula $E=m.c^2$ se deduce que la masa m asociada a la radiación, debe depender de la velocidad.

En efecto, derivando la expresión anterior es $dE=d(mc^2)=c^2.dm$ (ya que c es constante).

Ahora bien, sabemos por mecánica elemental que la variación de energía de un sistema es igual al trabajo de las fuerzas exteriores, así es:

$$dE=f.dx,$$

con la definición de fuerza que dio Newton: la variación de la cantidad de movimiento:

$$f = d(mv)/dt = m.dv/dt+v.dm/dt$$

Si consideramos que la masa no varía con el tiempo, resulta la conocida fórmula $f=m.dv/dt$ (fuerza = masa x aceleración), pero no es éste nuestro caso, ya que estamos buscando una variación de la masa con la velocidad. Así que nos quedamos con la expresión general de la fuerza:

$$f=m.dv/dt+v.dm/dt$$

De lo anterior surge que $dE=m.dv/dt.dx+v.dm/dt.dx$, pero como $dx/dt=v$, resulta $dE=m.v.dv+v^2.dm$

Damos ahora un salto en el vacío, uniendo esta última expresión, derivada de la mecánica clásica, con la expresión anterior de la variación de energía electromagnética $dE=c^2.dm$, y ponemos:

$$c^2.dm=m.v.dv+v^2.dm \text{ de donde}$$

$$dm(c^2-v^2)=m.v.dv, \text{ o sea} \quad dm/m = v.dv/(c^2-v^2) = -1/2 d(c^2-v^2)/(c^2-v^2)$$

Integrando ambos miembros queda

$$\ln m = -1/2 \ln(c^2-v^2) + \ln k$$

de donde, sacando antilogaritmos es

$$m=k(c^2-v^2)^{1/2},$$

lo que nos dice que la masa depende de la velocidad absoluta de traslación v

¿Qué significado físico tiene la constante de integración k ?. Veamos...; si la velocidad es nula, podemos llamar a la masa "en reposo" colocándole un subíndice adecuado, por ejemplo $m(v=0)=m_0$. Así $m_0=k/c$ de donde $k=m_0.c$, y reemplazando en la fórmula anterior es

$$m=m_0.c/(c^2-v^2)^{1/2}=m_0/(1-b^2)^{1/2} \text{ Recordemos que } b=v/c, \text{ es la relación entre velocidad de traslación y la de la luz.}$$

¿De qué manera varía la masa aparente m de una carga con su velocidad de traslación v ?. Examinemos la fórmula anterior, escrita en forma más elegante:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left[\frac{v}{c}\right]^2}}$$

¹⁹ Este tema requiere el uso de conceptos de cálculo diferencial básico, como derivaciones e integraciones simples y desarrollos en serie de potencias. Para los que no conocen estas herramientas, las demostraciones no aparecerán claras. Sin embargo pueden aprender las conclusiones.

Vemos así que la masa aumenta con la velocidad. Cuando la velocidad es nula ($v=0$) es $m = m_0$ (masa en reposo). Mientras la velocidad de traslación de la carga sea muy pequeña en comparación con la velocidad de la luz c , el denominador es muy poco menor que 1, o sea m es levemente mayor que la masa en reposo m_0 . En cambio, a velocidades muy altas, por ejemplo a la mitad de la velocidad de la luz c , el denominador vale $(1-0,25)^{1/2}=0,866$ y por lo tanto $m=1,154 m_0$, es decir que la masa aumenta más del 15%. La fórmula es válida hasta el límite $v=c$, valor para el que el denominador se anula y la masa se hace infinita.

El valor imaginario para el denominador cuando $v>c$ puede interpretarse como la imposibilidad de que cargas en movimiento puedan alcanzar velocidades de traslación mayores que la de la luz.

Lo anterior está relacionado con la expresión de la energía cinética de una masa m variable con la velocidad v de acuerdo a la fórmula vista $m = m_0/(1-b^2)^{1/2}$. Cuando una carga de masa asociada m pasa del reposo a la velocidad v , aumenta su energía en una cantidad igual a su energía cinética. Ésta vale entonces:

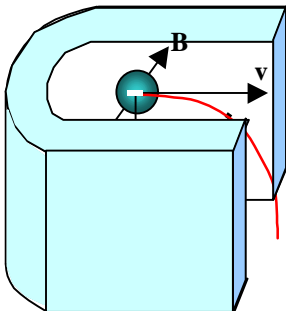
$$E_c = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 [(1-b^2)^{-1/2} - 1]$$

Si desarrollamos $(1-b^2)^{-1/2}$ en serie de potencias²⁰ resulta que:

$$(1-b^2)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} b^2 + \frac{3}{8} b^4 + \dots, \text{ de lo que se deduce que } E_c = \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 v^4 / c^2 + \dots$$

El primer término de la serie es el de la mecánica clásica. Los siguientes dan cuenta de la influencia del ingrediente electromagnético agregado a la mecánica.

La variación de la masa con la velocidad propuesta por Lorentz para su modelo de electrón en movimiento presenta ecuaciones del mismo tipo a la recién vista, aunque más complejas, ya que consideran que la medición de la masa es a través de una aceleración, la cual puede ejercerse en cualquier dirección con respecto a la velocidad. Si esa fuerza se ejerce perpendicularmente a la velocidad, como en el caso de una carga que atraviesa un campo magnético, la trayectoria circular que describe la partícula corresponde a una masa que concuerda con la apuntada.



Sobre un electrón de carga $-q$ que atraviesa un campo magnético B perpendicular a la velocidad v aparece una fuerza que a su vez es perpendicular al campo y a la velocidad, cuya expresión es $F = -qB\vec{v}$ (fuerza de Lorentz). Por efecto de la misma, la partícula cargada curva su trayectoria según una circunferencia de radio r tal que parece dotada de una masa m de acuerdo a la ecuación $F = mv^2/r$. Dicha **masa transversal** aumenta con la velocidad según la ecuación $m = m_0/(1-b^2)^{1/2}$

Lorentz la llama “**masa transversal**”, para distinguirla de la “**masa longitudinal**” que sale al considerar aceleraciones de la misma dirección que la velocidad.

La comprobación de la variación de la masa con la velocidad se ha llevado a cabo con electrones disparados mediante potenciales del orden del millón de volt. Alcanzan entonces velocidades importantes y su desviación por campos magnéticos que obran perpendicularmente a esta velocidad revelan un aumento de su masa transversal de acuerdo a la fórmula vista.

Ejemplo: Un electrón es acelerado con un potencial de 10^6 volt. ¿Qué velocidad alcanza? ¿Qué masa transversal presenta a esa velocidad?

Respuesta:

A un potencial acelerador de $V=10^6$ volt la energía del electrón de masa en reposo $m_0=9.10^{-31}$ Kg y carga $q=1,6.10^{-19}$ vale $V.q$. Esa energía debe ser igual a la energía cinética de la partícula, que según vimos vale $m_0.c^2 [(1-b^2)^{-1/2} - 1]$

Así entonces es $V.q=m_0.c^2 [(1-b^2)^{-1/2} - 1]$, de tal manera $(1-b^2)^{1/2} = (V.q/m_0.c^2 + 1)^{-1} = 0,50625$, de donde $1-b^2 = 0,2563$ y entonces $b=v/c=0,8623$, es decir $v=0,8623.c$ (¡casi el 90% de la velocidad de la luz!)

A esa velocidad su masa transversal vale $m = 1/(1-b^2)^{-1/2} .m_0 = 1,98.m_0$, es decir ¡casi el doble que su masa en reposo!

²⁰ Se puede desarrollar con la fórmula del binomio de Newton, a saber $(a+b)^n = \sum_{i=0,1,2,..} C_{n,i} . a^i . b^{(n-i)}$, con $C_{n,i} = n! / (n-i)! / i!$

NOCIONES DE LUMINOTECNIA.....	101
GENERALIDADES	101
<i>Ley de Weber-Fechner.....</i>	<i>101</i>
Ejemplo:	101
FUENTES DE LUZ.....	102
MAGNITUDES Y UNIDADES FUNDAMENTALES.....	102
Lugar o Actividad	104
Iluminación.....	104
recomendada (Lx).....	104
EL FLUJO CONSERVATIVO.....	105
VARIACIÓN DE LA ILUMINACIÓN CON LA DISTANCIA Y EL ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LOS RAYOS.....	105
<i>Variación de la iluminación con la distancia</i>	<i>106</i>
<i>Medida de la Iluminación.....</i>	<i>107</i>
<i>Rendimiento de las luminarias.....</i>	<i>109</i>
RADIACIÓN TÉRMICA	112
Temperatura en °C Color de la luz Ejemplo.....	112
<i>La densidad de energía espectral.....</i>	<i>115</i>
Fotones	119
Problemas	120
INTERACCIÓN ENTRE RADIACIÓN Y MATERIA	122
LUZ COHERENTE.....	123
<i>LÁSER</i>	<i>123</i>
<i>Equivalencia entre masa y energía</i>	<i>125</i>
<i>La masa electromagnética.....</i>	<i>126</i>
<i>El principio de conservación de masa-energía.....</i>	<i>127</i>
<i>Variación de la masa con la velocidad.....</i>	<i>128</i>