

FUNDAMENTOS

Yendo a nuestro tema específico, podemos afirmar que toda la historia comienza con lo que se llama carga eléctrica. La carga eléctrica es una propiedad de la materia, propiedad ésta de carácter muy especial.

Toda la materia existente está formada por átomos, de los que, en la naturaleza, podemos reconocer 92, desde el hidrógeno al uranio.

A su vez, estos átomos están contruidos por tres partículas "subatómicas" fundamentales:

protones, con 1 carga positiva
electrones, con 1 carga negativa
neutrones, sin carga eléctrica.

Los protones y neutrones, 1840 veces más pesados que los electrones residen en los núcleos de los átomos, mientras que los electrones se mueven alrededor de los núcleos ubicándose en capas bien determinadas.

La carga eléctrica resulta ser una de las propiedades de la materia más invariante. Sabemos que la masa de un cuerpo varía con su velocidad, según lo ha determinado A. Einstein en su Teoría de la Relatividad, hecho que ha sido totalmente comprobado en experimentos prácticas. Sin embargo la carga eléctrica no sufre cambio alguno. También es notable que un protón tenga exactamente la misma carga eléctrica que un electrón aunque de signo opuesto.

Que significa "signo opuesto"?

Es simplemente una convención de nombre. Lo fundamental es que dos cargas del mismo "signo" se repelen, y lo contrario sucede con las de distinto signo. Además existen solo dos signos posibles.

Sabemos que dentro del apretado volumen del núcleo de los átomos coexisten varios protones y neutrones. Los átomos, para ser estables, necesitan tener una proporción relativamente fija entre estas dos clases de partículas.

Lo que da el nombre a un átomo de un elemento, por ejemplo, cobre, es el número de protones que posee su núcleo. Un núcleo que pierde o gana un protón, pasa a ser otro elemento. Los neutrones, en cambio, tienen límites un poco más elásticos. Los átomos del mismo elemento

(misma cantidad de protones) que tienen distinta cantidad de neutrones en su núcleo se llaman isótopos de ese elemento.

Con toda esta introducción, estamos en condiciones de saber algo más:

Supongamos tener una carga eléctrica fija en un punto del espacio. Propongamos que tenga, por ejemplo, carga positiva.

Al acercarse a ella otra carga pequeña positiva, notaremos una repulsión en la misma. Llamemos a la carga pequeña, carga exploradora.

Esta repulsión es mucho más fuerte a medida que acercamos las cargas. Hasta que distancia las podremos acercar? Notamos que cuando estamos verdaderamente cerca, la fuerza de repulsión se incrementa tendiendo a infinito. Si graficamos la magnitud de la fuerza en función de la distancia de separación, nos damos cuenta de que si la distancia es cero la fuerza se hace infinita!

Por supuesto, si acercamos las cargas lentamente no llegaremos muy cerca de la carga mayor, pero si tomamos un fuerte empujón desde lejos, seguramente nos podremos acercar un poco más.

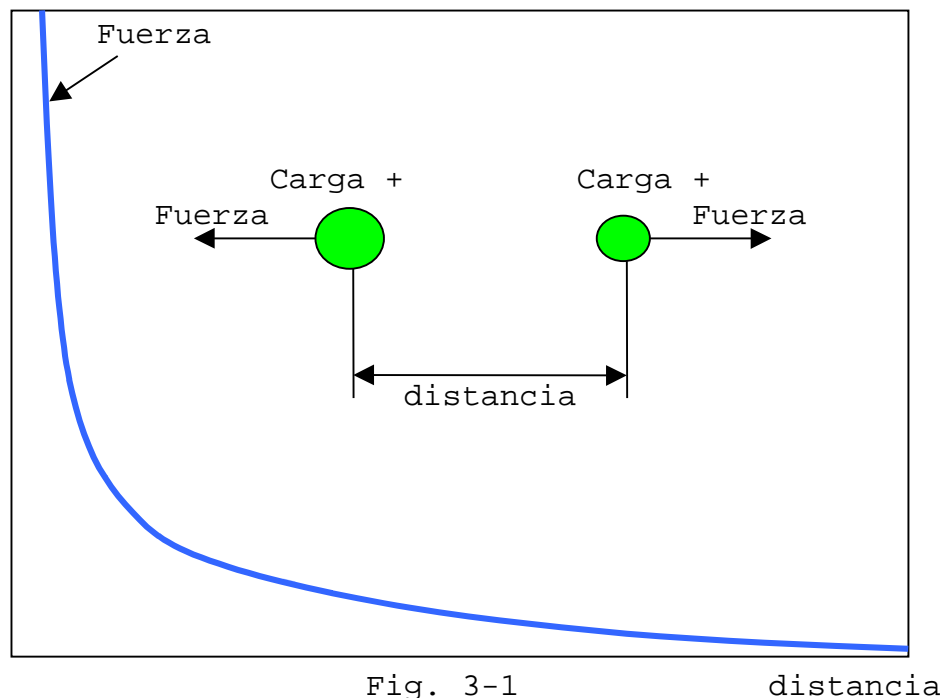


Fig. 3-1

distancia

Surge la pregunta: Como se pueden mantener unidos los protones en los núcleos atómicos, a distancias entre ellos pequeñísimas, lo que se traduciría en fuerzas de repulsión tremendas?

La naturaleza tiene, en estos casos, la fuerza "fuerte". A distancias muy pequeñas rige el imperio de esta fuerza. Esta es mayor a distancias más grandes (dentro del rango de las pequeñísimas distancias nucleares). Una analogía para facilitar su comprensión: es como un gancho con un resorte. Si por accidente (una colisión, por ejemplo) la distancia entre los protones nucleares supera el rango de esta fuerza, el núcleo estalla con gran violencia, liberándose así la repulsión eléctrica contenida.

No nos asombremos de que esta fuerza sea una novedad si se lee esto por primera vez. En la vida cotidiana no vamos a encontrar ejemplos de su acción fácilmente! Sin embargo es el pan de todos los días para los físicos nucleares.

Para tomar conciencia de la fuerza en cuestión vamos a hacer un experimento con el pensamiento, pues no se puede llevar a cabo realmente:

Supongamos tener unos 50 gramos de hierro. A cada átomo de hierro le quitamos un electrón y lo metemos en una botella. Queda así el hierro cargado positivamente y la botella negativamente, lo que ocasiona entre ellos una fuerza atractiva. Un cálculo simple nos permite saber que esta fuerza de atracción, si la distancia entre botella y hierro es de un metro para simplificar, es del orden de 10^{19} kilogramos!!

CAMPO ELÉCTRICO

Saliendo de los núcleos y retomando el tema:

El hecho de que al colocar una carga exploradora en un lugar del espacio, de lugar a una fuerza en ella nos hace decir que en ese punto existe un campo eléctrico. Es decir, el campo eléctrico se manifiesta como una fuerza sobre una carga eléctrica. Si no hay carga eléctrica exploradora no hay fuerza, o sea, el campo eléctrico actúa sobre cargas eléctricas.

Para estudiar el campo eléctrico colocaremos una carga positiva llamada $+q$ en el centro de una circunferencia de radio, por ejemplo, de 1 metro. A lo largo de ella colocaremos pequeñas cargas positivas exploradoras.

Con un dinamómetro en cada carga, mediremos la fuerza que ejerce la carga $+q$ sobre las exploradoras. Tendremos en cuenta magnitud y dirección de las fuerzas actuantes.

Nos damos cuenta que todas las fuerzas son de igual magnitud y sus direcciones son radiales, es decir, coinciden con los radio vectores que las separan de la carga $+q$.

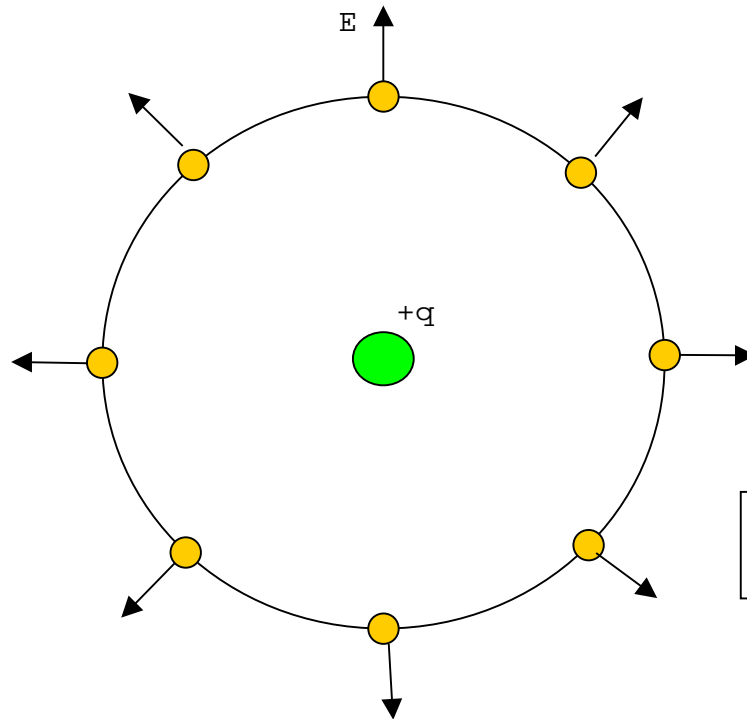


Fig. 3-2 Campo electrostático E

Las propiedades que se desean resaltar de este campo eléctrico, con este experimento, es su isotropía, es decir, la magnitud del campo es independiente de la dirección de los vectores, y el hecho de que los vectores fuerza son radiales.

Como este campo eléctrico no varía con el transcurso del tiempo decimos que es un campo electrostático. Esta situación puede permanecer indefinidamente. En este caso ninguna carga gana o pierde energía.

Que pasa si la carga principal no está fija y en cambio se mueve?

Hacemos venir la carga desde la izquierda en movimiento rectilíneo, con una velocidad constante \mathbf{v} . En el instante exacto en que la carga $+q$ pasa por el centro geométrico de la circunferencia, tomamos el valor de las fuerzas operantes en las exploradoras, y sus direcciones en el espacio.

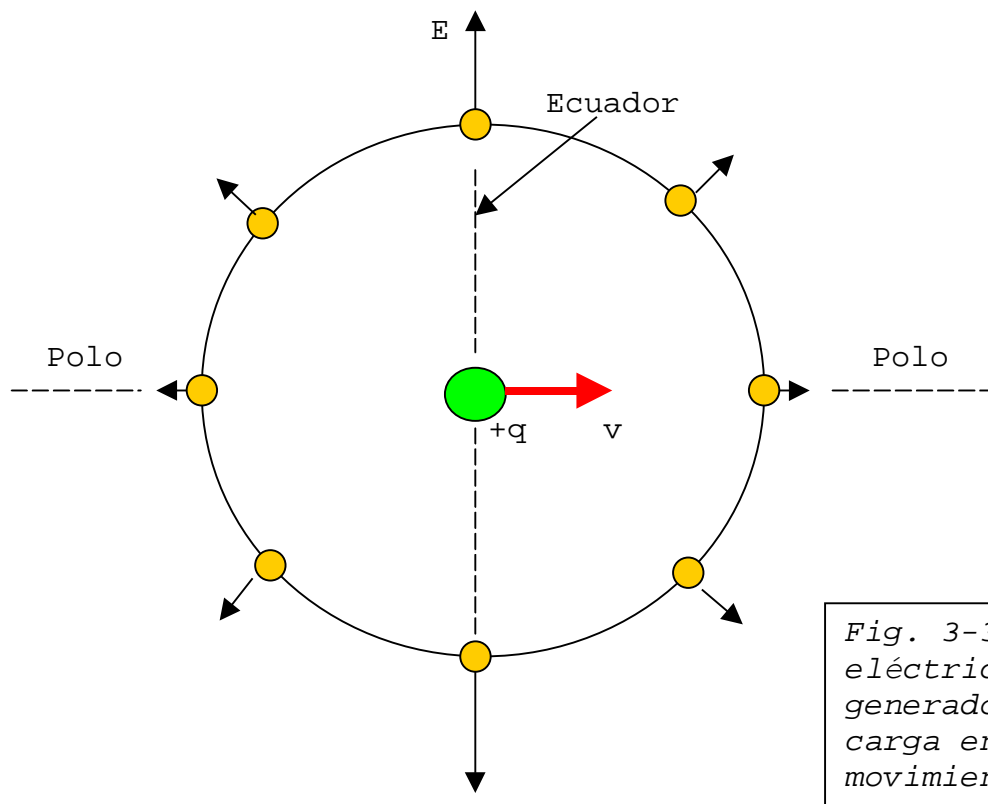


Fig. 3-3 Campo eléctrico E generado por una carga en movimiento.

Lo que vemos ahora es que el campo eléctrico ecuatorial aumenta un poco y el polar (en dirección del movimiento) disminuye otro tanto. Con esto el campo deja de ser isotrópico (ya su magnitud no es independiente de la dirección en el espacio), pero sigue siendo radial.

Pero, como antes, la carga principal no pierde energía.

Esta anisotropía del campo eléctrico producido por una carga en movimiento rectilíneo uniforme está causada por una razón relativística. Las líneas de fuerza del campo eléctrico, que son radiales e isotrópicas en el caso de una carga inmóvil, tienden a juntarse en los alrededores del plano ecuatorial del movimiento y a expandirse en las zonas polares a causa de la llamada contracción de Lorentz, en las dimensiones paralelas al vector velocidad, que sufre todo cuerpo que se mueve con respecto a un sistema considerado como fijo (las cargas exploradoras), desde el cual se mide.

Aunque la modificación porcentual de las fuerzas repulsivas es pequeñísima para las cargas con las velocidades que tienen típicamente dentro de los cables conductores (milímetros por segundo), las fuerzas de repulsión en sí son enormemente grandes, de modo que la modificación eficaz toma valores medibles. Estas modificaciones en las magnitudes de las fuerzas son, nada menos que las causantes de los campos magnéticos en las bobinas, imanes, etc.

Probamos ahora acelerando la carga principal que viene desde la izquierda. Cuando pasa por el centro de la circunferencia hacemos las mediciones de turno y comprobamos que las magnitudes medidas son muy parecidas a las tomadas anteriormente con la carga en movimiento uniforme, pero ahora las direcciones de las fuerzas dejan de ser radiales, inclinándose un poco hacia la dirección opuesta a la del movimiento.

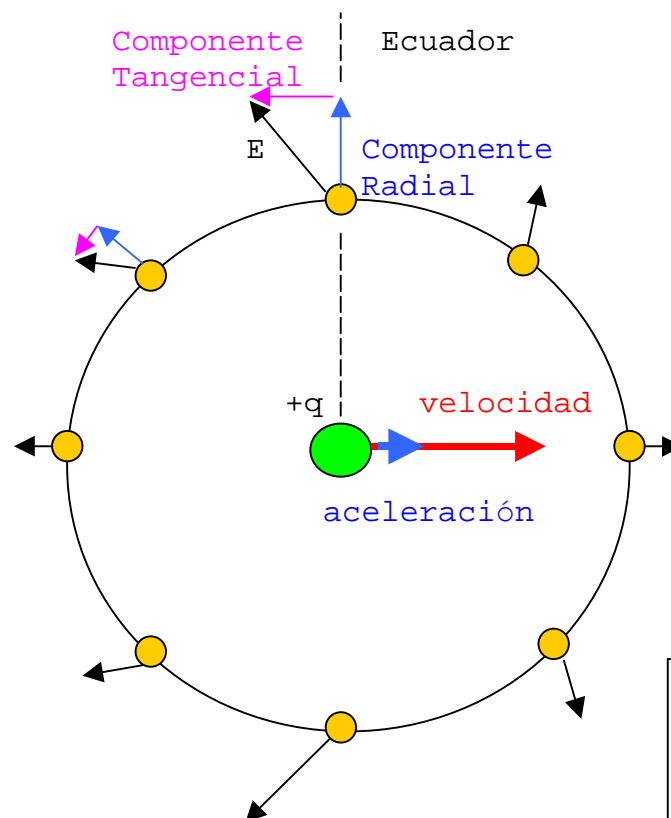


Fig. 3-4 Campo eléctrico E generado por una carga acelerada

Si las fuerzas no son radiales es porque apareció una componente perpendicular (tangencial) al radiovector. Esta componente normal al radiovector es la causante de un flujo de energía desde la carga móvil hacia afuera de ella, lo que hace perder energía a la carga. Este flujo no es otra cosa que la emisión de energía electromagnética. La componente tangencial es máxima en direcciones ecuatoriales y cero en las dos direcciones polares.

Es importante notar que, para la carga exploradora situada sobre el ecuador, la dirección de la componente del campo eléctrico de radiación es preferentemente paralela al movimiento de la carga pero la dirección de propagación de su energía es radial, es decir, normal a la componente del campo radiante.

ONDA ELECTROMAGNÉTICA (oem)

Dijimos que un campo eléctrico E se pone en evidencia por la fuerza que ejerce sobre las cargas eléctricas. Las oem son campos eléctricos (y magnéticos) que se trasladan a una velocidad que se llama velocidad de propagación.

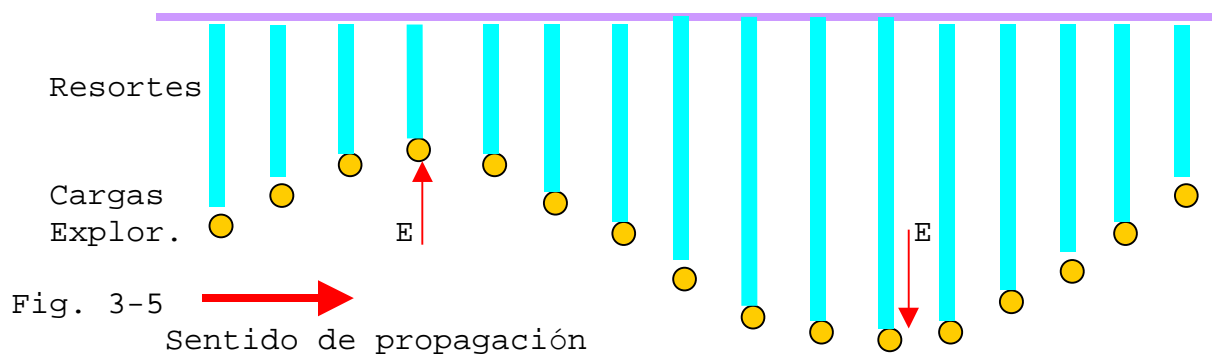
En el vacío esta velocidad es la de la luz (c), máxima velocidad posible en nuestro universo.

Para detectarlas hagamos un experimento mental.

Supongamos tener una hilera de pequeñas cargas exploradoras muy livianas colgadas de hipotéticos resortes.

Desde la izquierda ingresa una oem. La propagación se realiza hacia la derecha. Los campos eléctricos que forman la oem son perpendiculares a la dirección de propagación, supongamos, verticales.

Cuando la oem pasa por entre nuestra hilera de cargas, cada una de ellas tiende a moverse hacia arriba o abajo según sea el campo eléctrico E instantáneo actuante en ese punto, así que tomando una rapidísima fotografía instantánea de ellas, las descubriremos disponiéndose en forma de una onda sinusoidal. Una rápida secuencia de fotos posteriores nos revelarán que la onda sinusoidal se desplaza, como dijimos, hacia la derecha.



Si medimos la velocidad de desplazamiento de la onda veremos que es la velocidad de la luz, **c**. Midiendo la distancia que media entre dos valles consecutivos (o dos picos consecutivos) tendremos en unidades de longitud (centímetros, metros, etc.) su longitud de onda (λ).

La cantidad de ondas completas (de valle a valle) que pasan por una de las cargas por segundo se llama frecuencia (ondas por segundo = ciclos por segundo). A un ciclo por segundo se lo llama **Hertz** en honor al descubridor de estas ondas.

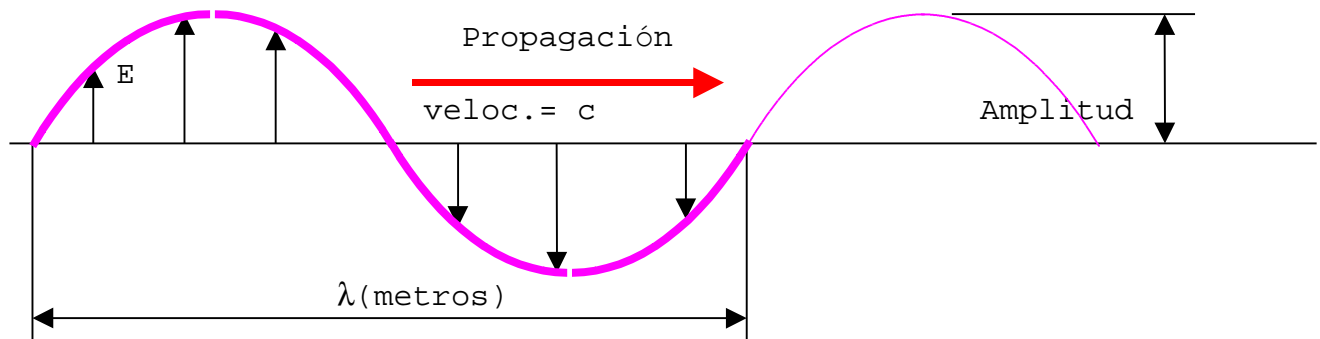


Fig. 3-6

Enseguida se nota que hay una relación entre las magnitudes:

$$f(\text{Hz}) = \frac{c \text{ (m/seg)}}{\lambda \text{ (m)}}$$

donde $f(\text{Hz})$ es la frecuencia en Hertz.

$c \text{ (m/seg)}$ es la velocidad de la luz en metros por segundo.

$\lambda \text{ (m)}$ es la longitud de la onda en metros.

Para simplificar cuando se trata de números grandes se usan múltiplos, por ejemplo:

Un Hertz	= 1 ciclo por segundo.	= 1 Hz
Un millón de ondas por segundo	= un Megaciclo por seg.	= 1 MHz
Mil millones de ondas p. seg.	= un Gigaciclo p. seg.	= 1 GHz

POLARIZACIÓN DE UNA OEM

En la descripción anterior sobre la onda que pasa por un conjunto de cargas exploradoras vimos que las cargas se desplazaban hacia arriba y abajo por acción de los campos eléctricos locales que van pasando.

También, en cierto instante habrá cargas que no se desplazan por estar en los "nodos" de la oem, o sea, donde la magnitud instantánea del campo eléctrico es cero. Si el desplazamiento de las cargas es vertical, se dice que la onda está "polarizada en un plano vertical" o que la onda es de polarización plana vertical.

Por supuesto, enseguida inferimos que la polarización plana de una oem puede tomar cualquier orientación: vertical, horizontal e inclinada.

Hemos representado al campo eléctrico E , gráficamente por un vector (una flecha) situado en el punto donde medimos (en una carga exploradora) con un largo proporcional a la fuerza del campo y la punta de la flecha orientada de acuerdo al sentido de dicha fuerza sobre la carga exploradora.

Existen otros tipos de polarizaciones (y de falta de polarización definida). Un caso simple es el de la polarización circular. En este caso, el vector campo eléctrico no cambia de magnitud a lo largo de la oem, sino que va girando hacia la derecha o hacia la izquierda.

Se puede deducir que el efecto que causará sobre las cargas exploradoras es impulsarlas a realizar un movimiento giratorio circular alrededor de la posición de reposo. Aquí la longitud de onda se mide entre dos posiciones paralelas y del mismo sentido de flecha del vector campo.

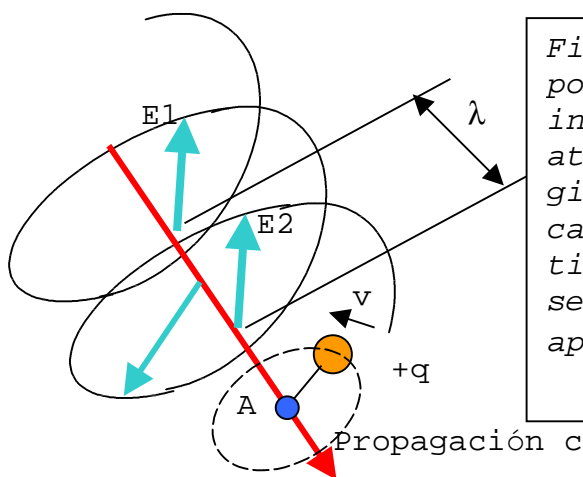


Fig. 3-7 Una onda de polarización circular que incide sobre una carga $+q$, atada al punto fijo A, la hace girar sincrónicamente con el campo eléctrico E . En este tipo de onda, el campo E nunca se anula. En el dibujo se aprecia la longitud de onda λ .

Un caso más general es el de la polarización elíptica. Se puede ejemplificar con un vector también giratorio del campo eléctrico pero su magnitud es variable según su orientación, es decir, por ejemplo, cuando el vector es vertical, es más grande que cuando es horizontal.

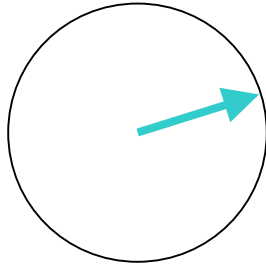


Fig.3-8 Polarización circular



Fig. 3-9 Polarización elíptica

La suma de dos ondas de polarización plana da origen a una de polarización elíptica (o circular) y viceversa.

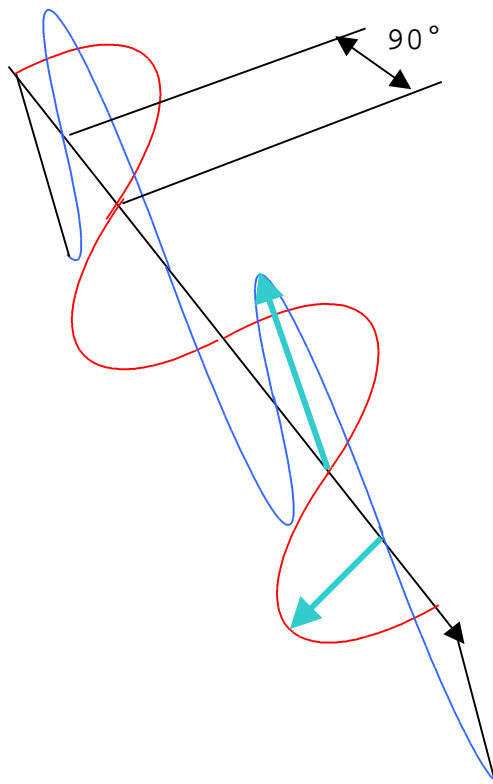
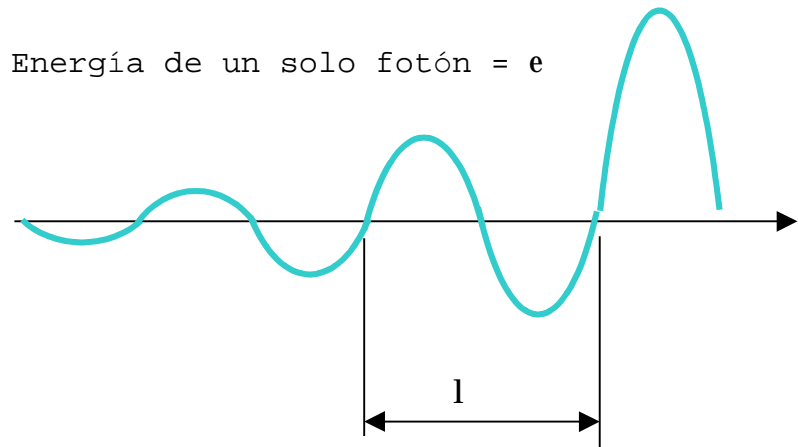


Fig. 3-10 En el gráfico vemos dos ondas de polarización plana desplazadas en fase un ángulo de 90° . En este caso la resultante de la suma vectorial da origen a una onda polarizada elípticamente.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Se llama espectro electromagnético a toda la extensión de ondas electromagnéticas que presentan todas las longitudes de onda (o frecuencias) posibles. La radiación electromagnética está "cuantificada" en piezas discontinuas, llamadas fotones.

Fig. 3-11 Un fotón es la mínima cantidad energía electromagnética que se puede obtener. El fotón presenta amortiguación natural, que se delata en el análisis espectral.



El físico alemán Max Plank descubrió que la energía de cada fotón de radiación electromagnética está relacionada con la frecuencia de la radiación estudiada, por la famosa ecuación

$$\varepsilon = h \nu$$

donde h = constante de Plank ($6.62 \cdot 10^{-34}$ joule seg)

ν = frecuencia de la radiación considerada (Hz)

Un exámen de la magnitud de la coonstante de Plank nos indica la pequeñez del valor de la energía de un solo fotón.

Cada onda de las diferentes zonas del espectro se origina a través de diferentes fenómenos físicos naturales o artificiales. Un extremo, el de las cortas longitudes de onda, lo constituyen los rayos gamma. El fenómeno físico que los propicia reside en los interiores de los núcleos atómicos.

En estas reducidas dimensiones imperan las leyes de la fuerza fuerte, la que liga a protones y neutrones en los núcleos atómicos, los que a su vez están formados por los elusivos quarks, que se mantienen unidos por gluones. Los rayos gamma se producen en la naturaleza en los fenómenos radiactivos (como el de la desintegración radiactiva del uranio en los reactores nucleares). El hombre produce rayos gamma

en los aceleradores de partículas. Luego de tomar velocidades relativísticas, los iones de los átomos acelerados, chocan violentamente con un "blanco", o "de cabeza" con otro grupo de átomos que se aceleró en dirección opuesta. Radiación gamma pura se produce también en la aniquilación de una partícula con su antipartícula.

Siguen la radiación X, originada en las capas electrónicas más profundas de los átomos pesados. En este caso, la radiación no proviene del núcleo de los átomos, sino desde su entorno cercano.

A continuación, la "luz ultravioleta", la luz "visible" y la radiación infrarroja. Todas originadas en las capas electrónicas exteriores de los átomos. Aquí los electrones están menos ligados a los átomos y los procesos de cambios de nivel energético, que dan lugar a la emisión son mucho menos violentos.

Ahora, en dirección de las longitudes de onda crecientes, comienza el imperio de las ondas de radio, primero con las submilimétricas, milimétricas, centimétricas y así siguiendo, hasta kilométricas.

Los mecanismos de producción de las ondas electromagnéticas de radio es muy variado: Desde cambios energéticos en oscilaciones moleculares, oscilaciones electrónicas en cavidades, masers, sutiles cambios de nivel energético atómicos por inversión del spin, recombinación ión-electrón en algunos átomos, emisión artificial por medios humanos.

Por supuesto, no se pretende dar una idea completa de todos los fenómenos físicos ligados con la emisión electromagnética en cada banda pues la lista sería vasta, además estas zonas espectrales no son privativas de cada fenómeno físico que la origina, sino que se solapan bandas espectrales con fenómenos originadores. Existe un caso muy importante de emisión distribuida a lo largo de gran parte del espectro y que implica un solo fenómeno productor: La emisión por efecto sincrotrón. Ya lo veremos más adelante.

NOMBRE DE ALGUNAS BANDAS DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

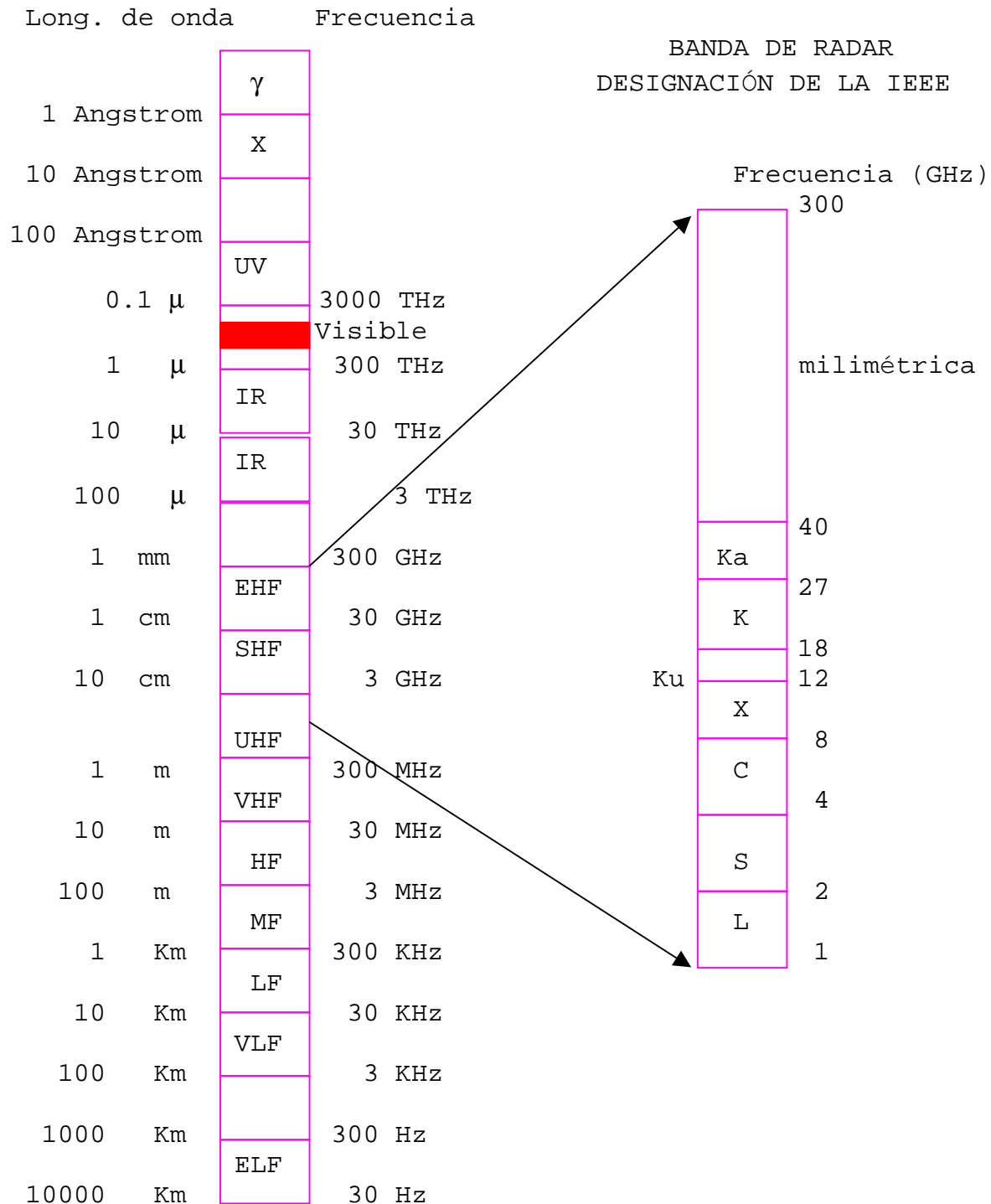


Fig. 3-12

EMISIÓN DE ONDAS DE RADIO

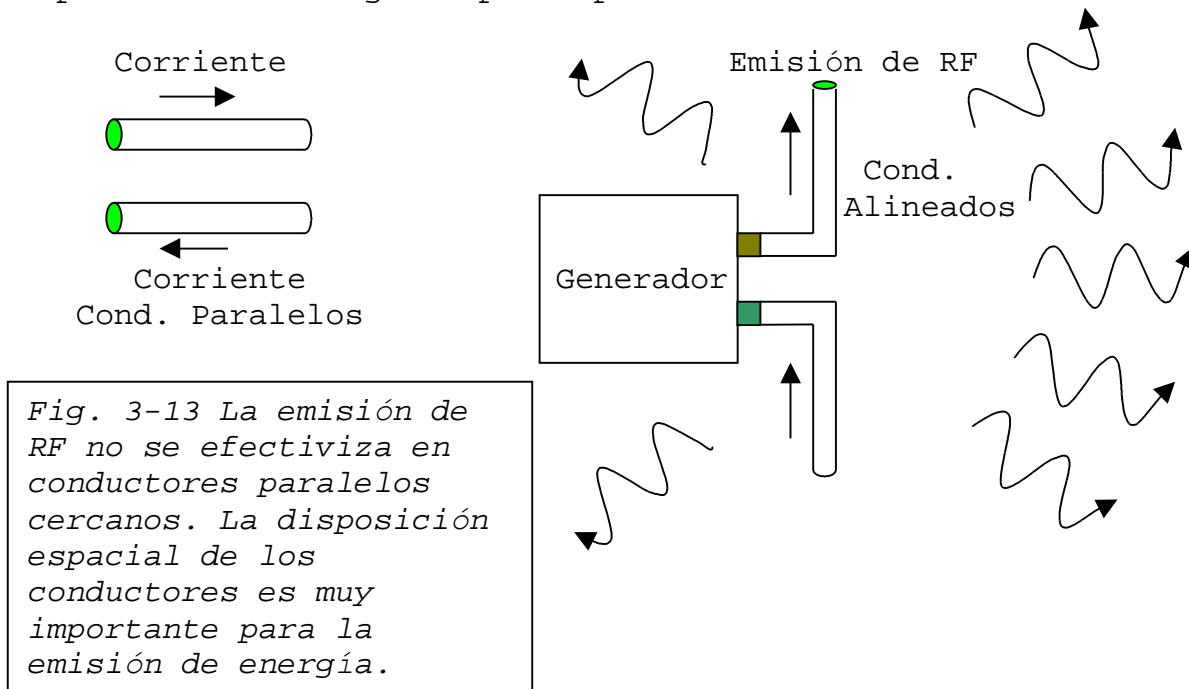
Retomando nuestro tema, diremos que los principales responsables de la emisión de oem son los electrones. Por que?

La corriente eléctrica a través de un elemento conductor (un metal) no es otra cosa que el fluir de una corriente de electrones por entre los átomos fijos de la estructura cristalina del conductor.

Una corriente eléctrica constante y uniforme (corriente continua) mantendrá los electrones a velocidad constante lo que no resultará en emisión. Pero si proveemos los medios para variar esa corriente, cada electrón individual contribuirá con su pequeña emisión y sumaremos los campos transversales de cada uno. Así todo conductor por donde circule una corriente variable emitirá energía.

Enseguida se ve que dos conductores paralelos cercanos, donde circulan corrientes variables, uno llevándola y otro retornándola, cerrando así un circuito no emitirán en conjunto pues cuando uno de los conductores emite un campo hacia adelante el otro emite otro igual hacia atrás anulando al primero. Esto se cumple si los conductores están dispuestos a corta distancia.

Sin embargo separando los conductores adecuadamente resultará en una emisión neta de energía al espacio. La disposición de los conductores se puede cambiar a gusto para optimizar la emisión.



En el dibujo vemos una de las formas que optimiza la radiación al espacio de oem. En este caso se registra una transferencia neta de potencia desde el generador hasta el entorno circundante. El generador inyecta una corriente variable en los terminales de los conductores, condición necesaria para la radiación. La forma de variación de la corriente es usualmente la sinusoidal. Podemos asegurar que la corriente está variando sin dudas pues, por ejemplo, en el terminal superior, en un momento se inyectan electrones y en otro momento se extraen. Esto origina que ellos tomen velocidad, se frenen, inviertan el sentido de su movimiento, se aceleren y frenen secuencialmente.

Cuando la longitud total de los conductores toma una magnitud igual a la mitad del largo de onda, la emisión se potencia considerablemente. El largo de onda correspondiente se calcula en base a la frecuencia de variación de la corriente inyectada con la fórmula dada más arriba. Esta fórmula tiene formas más sencillas, de acuerdo a las unidades usadas, por ejemplo:

$$f(\text{Mhz}) = \frac{300}{\lambda \text{ (m)}}$$

$$f(\text{GHz}) = \frac{300}{\lambda \text{ (mm)}}$$

Los conductores así dimensionados toman el nombre de "dipolo de media onda", y como podemos sospechar de todo lo dicho antes sobre la forma en que emiten energía las partículas cargadas que tienen movimiento acelerado, la "densidad de potencia" emitida es máxima en las zonas ecuatoriales y cero en las alineadas con el dipolo.

No se debe confundir la densidad de potencia emitida con la velocidad de propagación de la onda que sale del dipolo. El frente de onda de la emisión es esférico, centrado en el centro del dipolo. El frente de onda es la superficie que une todos los puntos de la misma fase de la onda, por ejemplo, todos los picos, en los alrededores del elemento emisor.

El radio de la esfera que forma el frente de onda se agranda a la velocidad de la luz, y a medida que su radio aumenta, su superficie tiende a aumentar y aplanarse de modo que para un observador muy lejano este frente de onda tiene forma casi plana.

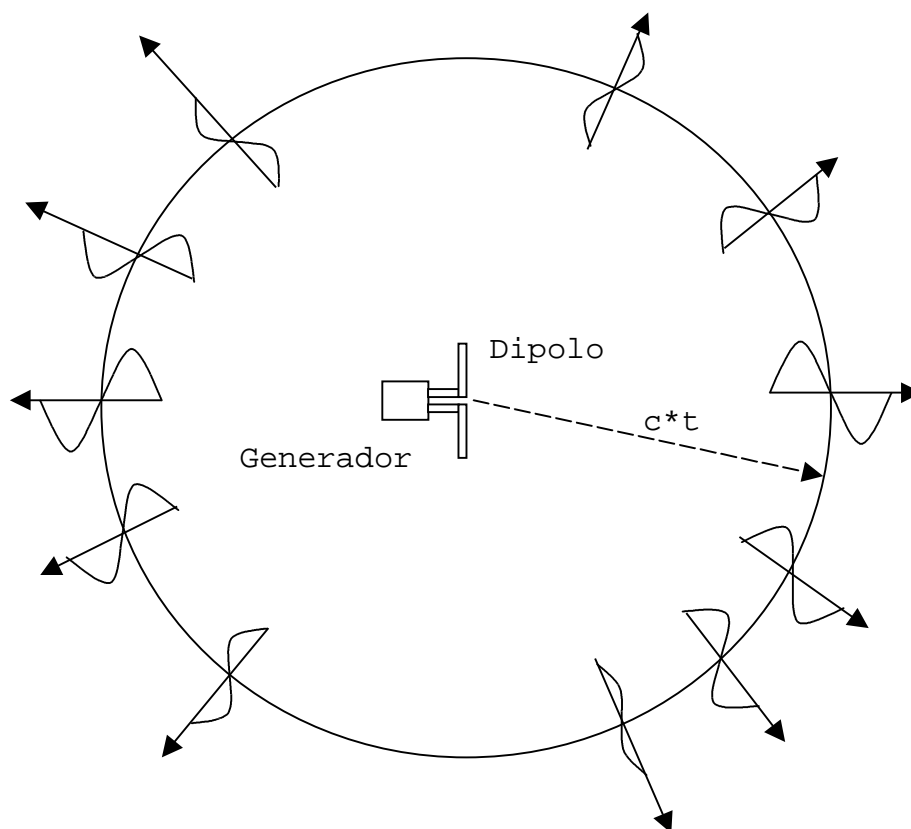


Fig. 3-14 El dipolo entrega al espacio circundante una potencia que no se distribuye equitativamente en cada dirección. Sobre el plano perpendicular a los conductores del dipolo (ecuador) la potencia entregada es máxima, y decrece acercándose a los polos, donde se anula. Este efecto se muestra en la variable amplitud de las ondas según su dirección.

El dipolo es una antena elemental. Existe una gran variedad de diseños de antena que usan o no dipolos. Con sus diferentes diseños se optimizan ciertas características que las adecuan para su uso específico.

Hasta ahora hablamos de "emisión". Esto se trató así para dar una idea de una de las formas en que aparece una onda de radio en el espacio.

Es una de las maneras en que el hombre suele emitir para transmitir información. Más adelante veremos las formas que sabemos que usa la naturaleza para crear sus propias ondas. Lógicamente este conocimiento nos enseñará mucho sobre las condiciones físicas del medio en donde se originan.

Sin embargo, gran parte de la radioastronomía se dedica a estudios pasivos, es decir, sin emisión por parte del observador. Se investiga qué ondas, y como llegan hasta nosotros desde los diferentes cuerpos celestes que irradian naturalmente. Para ello se necesitan "receptores".

Las antenas son "reversibles", es decir, se usan tanto para emitir como para recibir ondas.

Cuando una onda con frente plano (originada lejanamente) llega a un dipolo induce en los terminales del mismo una tensión que puede impulsar una corriente si se cierra el circuito adecuadamente.

Generalmente, se hace circular esta corriente por la entrada de un amplificador ajustado a ese dipolo. Debe haber un ajuste entre antena y entrada de amplificador a fin de maximizar la transferencia de potencia desde el dipolo hacia el amplificador, de otro modo, el dipolo irradiará nuevamente la energía que le llega. Se dice, en este caso, que el amplificador está "adaptado" a la antena.

En general, la antena (dipolo en este caso) cede su potencia capturada a un cable, y a su vez, el cable al amplificador. Así, la antena debe estar adaptada al cable y el cable al amplificador. Los cables usados para estos fines son especiales y se llaman "líneas de transmisión".

El conocimiento del comportamiento de estas líneas requiere todo un estudio especial. Pueden ser bifilares, cuadrifilares, coaxiales, etc. Cada tipo tiene su uso especial. Por ejemplo, las líneas bifilares (dos conductores) transportan la energía electromagnética en forma **balanceada**, es decir, un conductor actúa como el retorno del otro. En cambio, en una línea coaxial, la energía se transporta por corrientes solo en el conductor central; en el exterior no se registran corrientes y está a potencial de tierra. Esta característica lo hace adecuado para proteger al conductor central de interferencias externas.

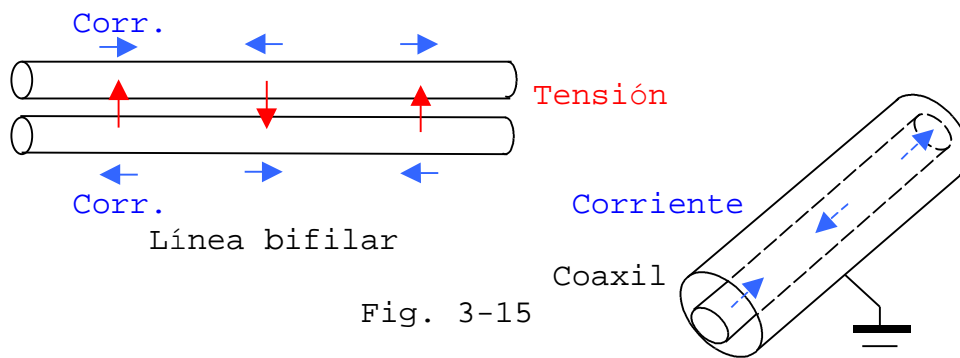


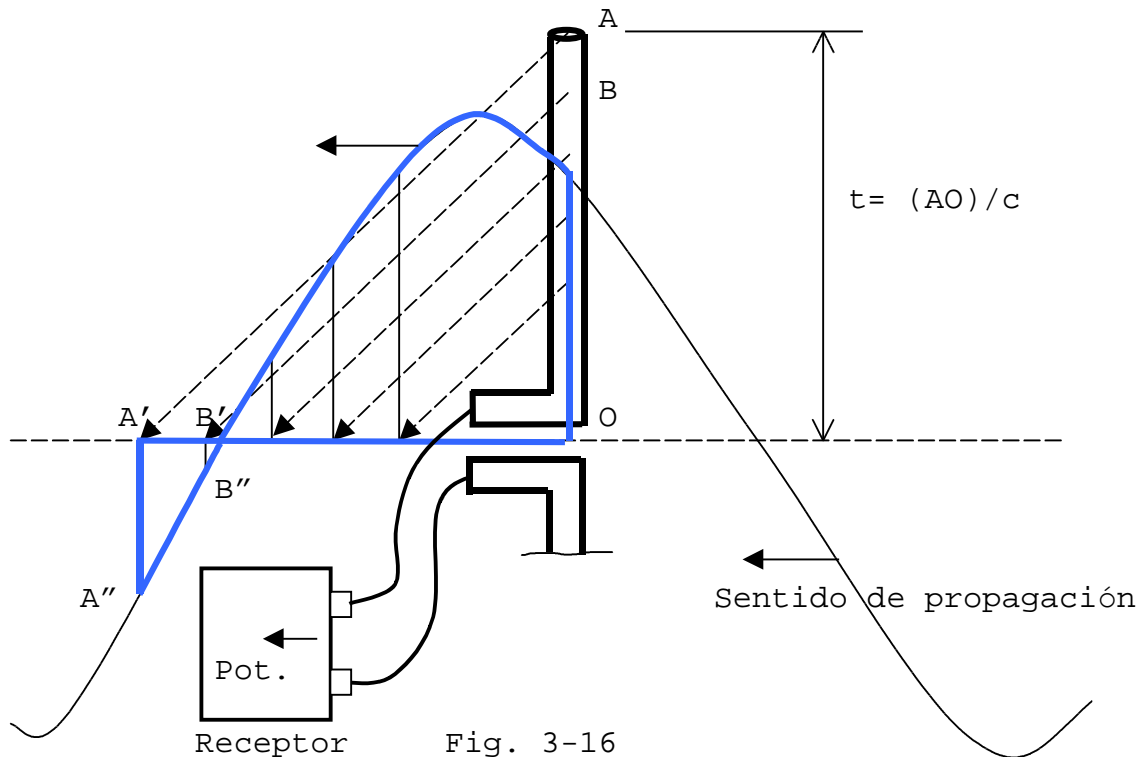
Fig. 3-15

ANTENA EN RECEPCIÓN

Veremos el caso de un dipolo intersectando una onda originada por una fuente, que se supone a infinita distancia, por lo cual el **frente de onda** incidente es plano. En este dipolo se inducirán tensiones que harán circular corrientes por sus conductores que pasarán por la entrada del primer amplificador del receptor conectado a ella.

La tensión instantánea en el punto O en un momento dado, digamos $t=0$, será la suma de todas las pequeñas contribuciones que llegarán a O desde cada punto del conductor del dipolo.

El tiempo que tarda cada contribución de cada pequeño segmento del dipolo está dado por su distancia al punto O, y se ve en el gráfico para el punto A.



Con la senoide se representa el campo eléctrico instantáneo, para el momento $t=0$. Esta senoide se propaga hacia la izquierda con velocidad c . Veremos la contribución en la tensión total en O, en el instante $t=0$, provocada por un punto cualquiera. Elegimos el A.

La contribución desde A, proviene de un momento $t = -(AO)/c$ anterior a $t=0$. En ese momento, la onda estaba más a la derecha de lo que está representada. Justamente la intensidad de campo A'A'' era la

coincidente con el conductor del dipolo. Así que para relacionar cada punto del dipolo con el campo eléctrico que había en la antena en el momento de su contribución, trazamos líneas a 45° como se ve en el gráfico. La contribución total se hallará sumando todas la que provienen de todos los puntos de la antena. Esto lleva a que la tensión instantánea en O, en el momento $t=0$ es proporcional al área neta encerrada por las curvas y rectas azules. En este diagrama hay áreas positivas y otras negativas. La tensión en O será el saldo de estas superficies.

Si el dipolo es de media onda, el largo de onda que estará implicado (area encerrada) será de $1/4$ de onda. En el momento $t=0$, el área rayada nos dará una idea de la tensión en terminales. El área mencionada se deberá tomar con su signo algebraico, positivo o negativo. Como la onda se va desplazando, en otro momento t_1 , el área onda que contribuye a formar la tensión en terminales puede ser otra, por ejemplo **a1**. Si **a1** tiene una parte positiva y otra de igual valor negativa, la tensión en terminales en ese momento será cero. Considerando con el mismo razonamiento una cantidad de instantes t , veremos que la tensión en terminales sigue también una ley senoidal con el tiempo, con la misma frecuencia de la oem.

De esa forma vemos como un dipolo puede capturar una muestra de energía electromagnética desde el espacio e introducirla en un receptor para su procesamiento.

DIAGRAMA DE RADIACIÓN

Para conocer el comportamiento de una antena cualquiera bajo diferentes orientaciones se suele medir su diagrama de radiación.

Un método práctico para su obtención consiste en preparar una antena distante que, alimentada desde un generador de radiofrecuencia, actúe de emisora. Se procura que medie una distancia grande entre antenas emisora y receptora a fin de obtener sobre la receptora, que será la antena bajo prueba, un frente de onda plano.

Se mide, entonces la potencia recibida en la receptora para diferentes ángulos de orientación respecto de la línea imaginaria que las une de modo de poder representar gráficamente los resultados.

Una antena isotrópica presentaría un comportamiento uniforme, es decir, recibiría siempre la misma potencia en el experimento,

independientemente de la orientación de la misma. A este elemento, hipotético, se lo da en llamar "radiador isotrópico" y es la referencia que se usa universalmente para comparar toda antena.

En cambio, un dipolo tiene, como se dijo, direcciones preferenciales hacia el ecuador (perpendicular al dipolo) y es cero en la dirección de su eje. Es así que un dipolo recibe 1.64 veces más potencia que un radiador isotrópico cuando está adecuadamente orientado.

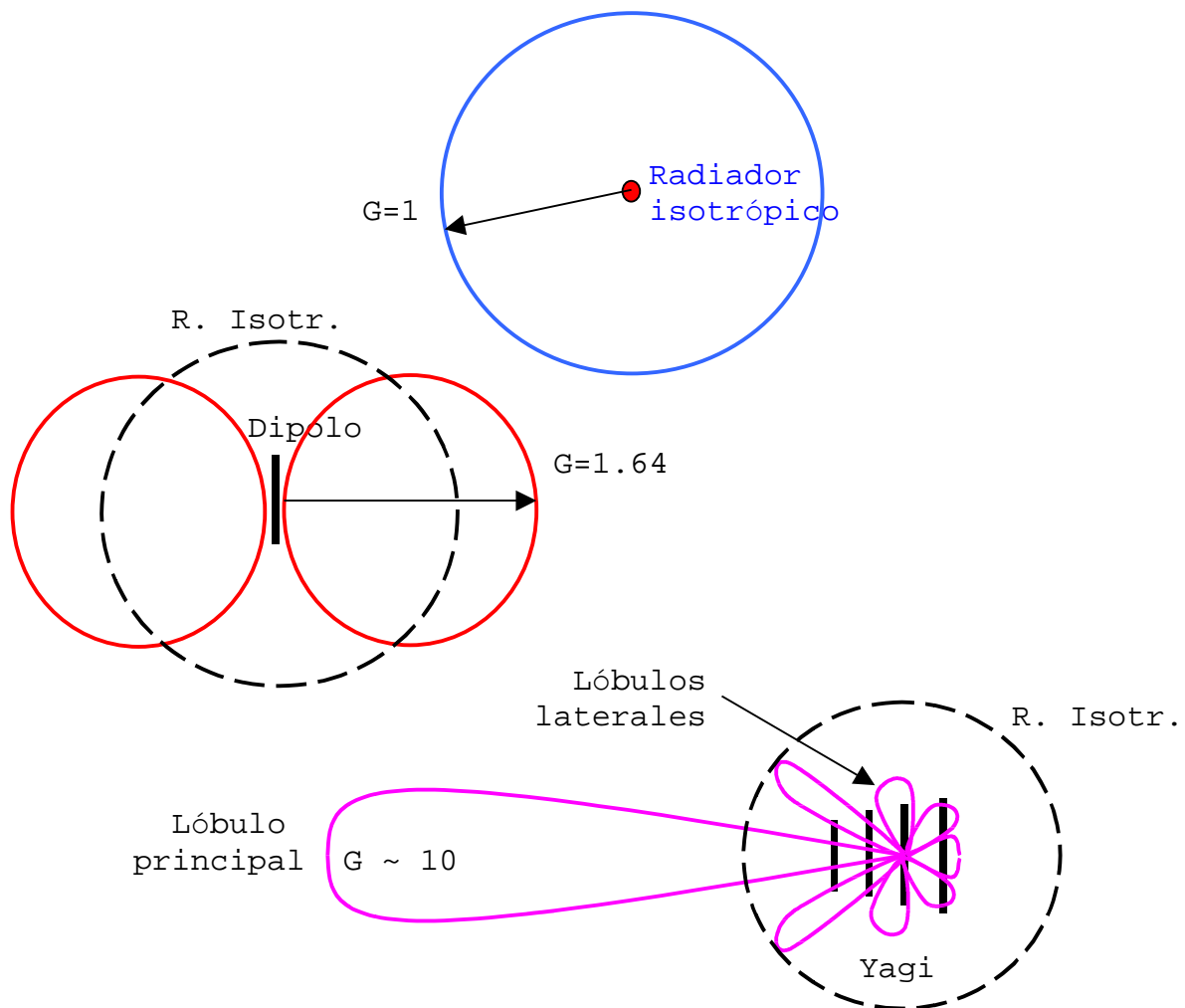


Fig. 3-17 Diagramas de radiación típicos y su comparación con el de un radiador isotrópico. El radiovector del diagrama es la ganancia de la antena G . Para una Yagi, G puede estar en alrededor de 10.

Si paralelamente a un dipolo se coloca otro un 5 % más largo a una distancia de 0.2λ , el diagrama cambia, dando preferencia al lado opuesto al agregado. Este dipolo adicionado no se conecta al

receptor sino que va cortocircuitado en sus terminales. Es un elemento pasivo pues no está conectado al receptor (o al generador).

Por lo dicho antes, se da el nombre de reflector al elemento agregado.

Colocando otro dipolo pasivo del otro lado del reflector, a una distancia parecida pero con un largo de 5% menor al del dipolo activo, se intensifica la potencia recibida aún más en esa dirección. Por eso se llama "director" a ese elemento.

Una antenna hecha de un elemento activo, un reflector y varios directores toma el nombre de antenna Yagi, y es una de las antenas más difundidas por haber sido usadas en los receptores de TV. Son antenas para manejar ondas de polarización plana, horizontal o vertical, según su disposición.

Como una onda de polarización circular se puede descomponer en la suma de dos ondas de polarización plana, con planos de oscilación perpendiculares entre si, y defasadas en 90° , una antenna Yagi estará en condiciones de captar una de las componentes.

Es posible, con dipolos cruzados y distanciados a $1/4$ de onda, recibir ondas de polarización circular a un sentido y no al otro.

Otra antenna muy importante para estudios de polarización circular es la inventada por el Dr. Kraus en forma de hélice. Una helicoide de alambre de un diámetro de espira igual a $1/3$ de la long. de onda y un paso entre espiras de $1/4$ de λ , con un número de vueltas superior a 1, puede ser una antenna receptora adecuada para ondas polarizadas circularmente en un solo sentido. También puede trabajar con ondas de polarización plana.

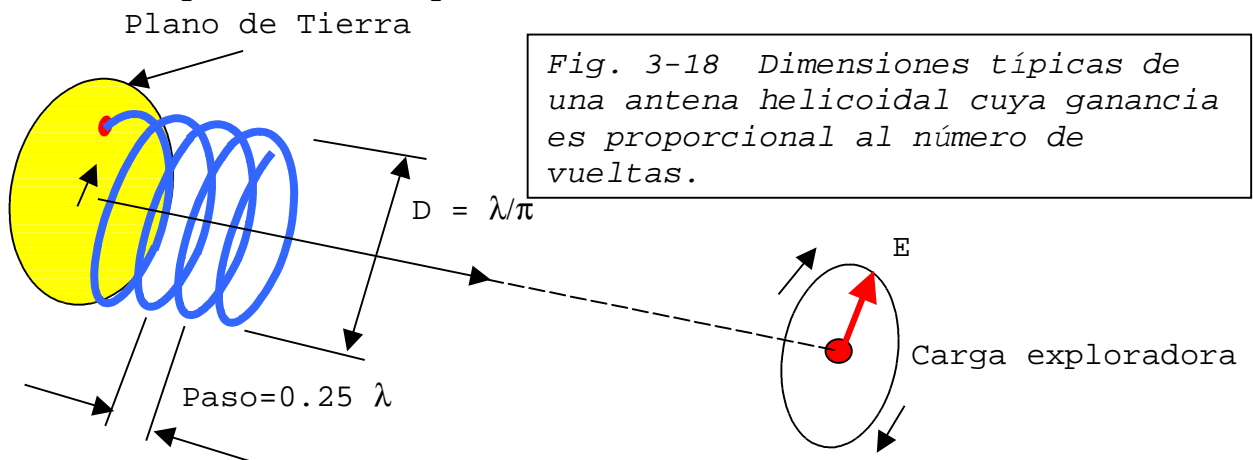


Fig. 3-19 Una antena que no presenta lóbulos laterales es la bocina. La de la derecha, es la bocina con reflector paraboloïdal, que usaron Penzias y Wilson para descubrir la radiación de fondo cósmica de 3 grados Kelvin.

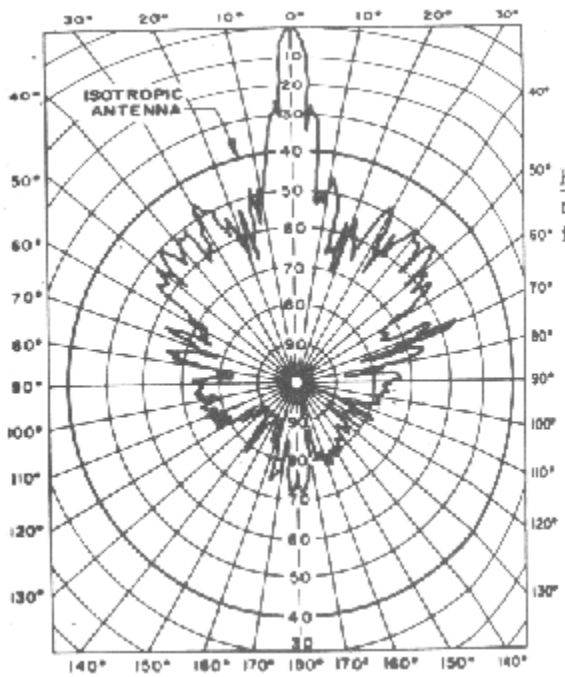
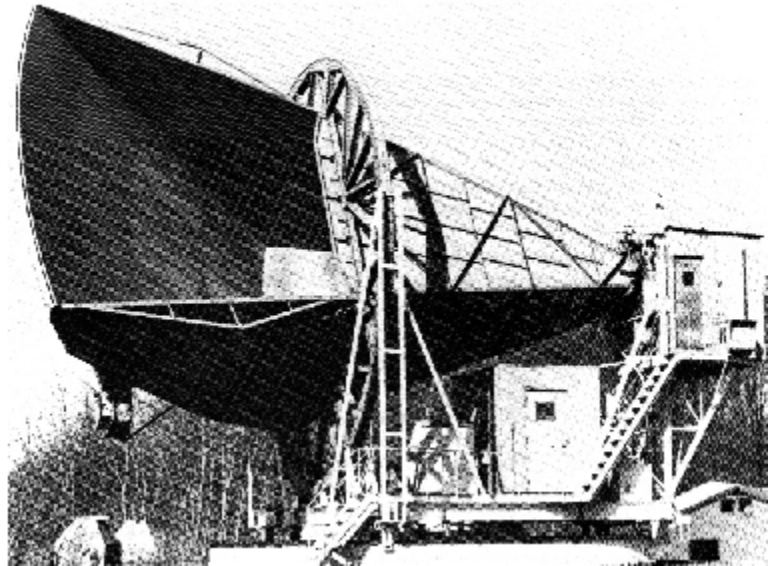


Fig. 3-20 La bocina con reflector paraboloïdal con montura azimutal permite barrer todo el cielo. La investigación de Penzias y Wilson en ondas de 7 cm, estaba dirigida a las comunicaciones, por medio del satélite Eco-un globo de mylar aluminizado de 30 metros de diámetro en órbita baja- lo que en sí no obtuvo buen resultado, pero, casi sin querer, se encontraron descubriendo un importante fenómeno cósmico, lo que les valió el Premio Nobel. Vemos el diagrama de radiación de la bocina, comparada con el radiador isotrópico.

ANCHO DE BANDA DE UNA ANTENA

Es necesario destacar que toda antena tiene un desempeño correcto dentro de un rango de frecuencias específico al que se llama ancho de banda. Los diferentes tipos de antenas mencionados hasta ahora tienen una variedad de comportamientos diferentes, por ejemplo, una antena Yagi suele tener un estrecho margen. Debe estar correctamente diseñada para trabajar en la frecuencia asignada, aunque hay una serie de estrategias para modificar estas características en algún grado.

Una helicoidal tiene a su favor la posibilidad de manejar un amplio espectro, llegando a estar sus márgenes en relación 2:1.

Hay muchos otros tipos de antenas usadas en radioastronomía. Las antenas rómbicas son un caso de dispositivo de gran ancho de banda como la helicoidal, pero no es muy usada por su gran tamaño y la abundancia de lóbulos laterales.

EL REFLECTOR PARABÓLICO

Es el tipo más común entre radioastrónomos. No está comprometido con ninguna frecuencia específica, salvo dentro de límites muy amplios.

Se diseñan con diámetros mayores a 10λ , que es un límite inferior práctico. El máximo alejamiento de su superficie real al de una parábola perfecta está en el décimo de λ , esto pone un límite superior a la frecuencia de trabajo admisible en un reflector determinado. Hoy existen grandes reflectores que trabajan con ondas de 0.8 mm de long. de onda, y la precisión de sus superficies se asemeja a la de un instrumento óptico.

Las oem provenientes de cuerpos celestes se reflejan en su superficie y se dirigen hacia el foco en un frente de onda esférico.

En el foco se coloca el llamado iluminador o alimentador que puede ser un sector de antena helicoidal de ancho lóbulo (2 o 3 espiras), un dipolo, un conjunto de dipolos, una bocina y guía de onda, etc.

ANCHO DE HAZ DE UNA ANTENA

Los diagramas de radiación de las antenas en general se suelen dibujar en coordenadas polares a fin de visualizar su comportamiento en forma intuitiva. Normalmente se nota en ellos un "lóbulo principal" de gran tamaño y otros secundarios menores. Al ángulo abarcado por el lóbulo principal se lo llama "ancho angular del haz de la antena", y viene a dar una medida de la agudeza con que esa antena puede discernir las posiciones de dos fuentes próximas sin confundirlas. Debe pensarse que si esa antena se usa para la obtención de imágenes de las radiofuentes celestes, las fuentes "puntuales" tendrán el tamaño aparente igual al ancho del haz.

Normalmente, un reflector parabólico típico usado en emisión, irradia aproximadamente la mitad de la potencia por su lóbulo principal.

UN RADIOTELESCOPIO TÍPICO

Veremos como se compone un instrumento radioastronómico genérico.

Comienza en la antena, elemento importantísimo del instrumento, pues lo que no entra por la antena, no se puede recrear por medio de ningún proceso posterior, por ello suele ser la instalación más cara por lejos de todo el conjunto.

Existen varias razones para encarecer esa parte del instrumento:

Con una gran antena (cara) se puede obtener un haz más fino redundando en una mejor resolución angular. Una superficie de precisión eleva el límite superior de frecuencias posibles a usar con el instrumento.

Un mayor tamaño redundante en una mayor área efectiva que tiende a minimizar los efectos de la interferencia humana.

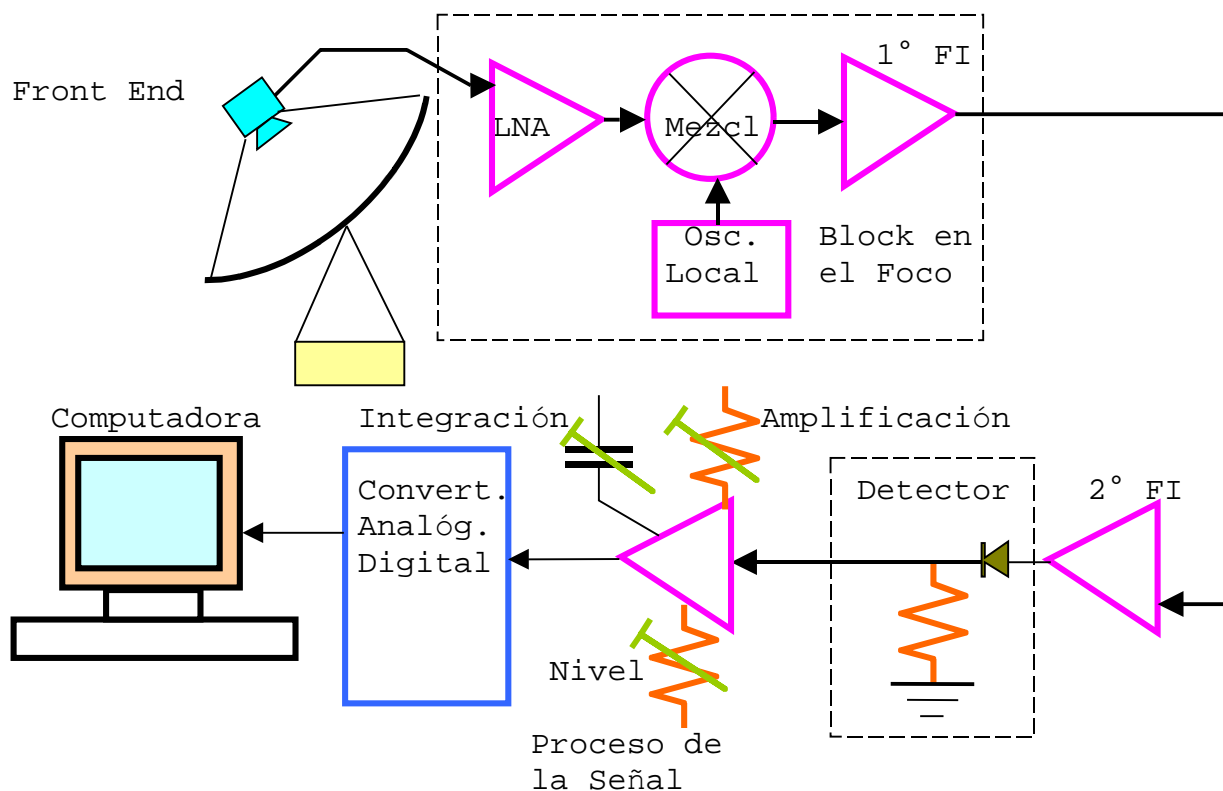


Fig. 3-21

Debe pensarse que las señales provenientes de los objetos celestes

son muy débiles. A pesar de usarse antenas con áreas "colectoras" del orden de las decenas o centenas de metros cuadrados, la potencia que resulta aparecer en sus terminales y que se entrega a la primera etapa del receptor es del orden de 10^{-15} o 10^{-20} watt y se debe amplificar de diez mil a cien mil millones de veces (100 a 110 dB) para que la señal sea manejable por los instrumentos de medición.

Hablando de un instrumento con reflector parabólico, en el iluminador (también llamado Front End, extremo frontal) puede haber una bocina, un dipolo o varios, una hélice corta, etc, que captura la señal que llega al foco y la envía a la primer etapa del instrumento que es el "amplificador de bajo ruido o LNA" por Low Noise Amplifier, donde se limita en parte el ancho de banda a entrar a las etapas siguientes y se preamplifica la señal.

Dentro mismo del Front End, se produce la primer "conversión" de frecuencia (receptor heterodino), es decir, se baja la frecuencia de la señal batiéndola con otra señal constante generada por un oscilador llamado "Oscilador Local". Existen varias razones para hacer esta conversión; una es aumentar la estabilidad del sistema, pues si toda la cadena amplificadora se diseña para la misma frecuencia queda muy propensa a oscilar sin control. Otra razón es la de posibilitar, dentro de ciertos márgenes, la sintonización del receptor variando solo la frecuencia del Oscilador Local, como se hace normalmente en un receptor de radio doméstico. También los amplificadores que trabajan en menores frecuencias son de construcción más simple.

Esta serie de amplificadores de frecuencia "convertida" se llaman etapas de **Frecuencia Intermedia (FI)**. Es aquí donde se limita en mayor grado la banda de frecuencias tomadas por el radiotelescopio. Este ancho de banda es de gran importancia ya que determina, junto con otros parámetros que veremos más adelante, la sensibilidad del equipo, es decir, la radiofuente más débil, discernible del ruido de fondo, del instrumento.

Al final de estas etapas, a veces se sucede una segunda conversión, aunque en los casos más simples se continúa con la etapa detectora.

En esta etapa detectora, la señal se "rectifica" a fin de ser medida directamente por los instrumentos dedicados a ello, aunque antes esta señal rectificada se procese algo.

Los procesos realizados a esta altura son la **Integración**, adecuación de **Nivel** y **Amplificación de Continua**.

La integración suaviza o promedia la señal que sale del detector y que es rápidamente variable. Con el aumento de la integración o suavizado, se reducen las fluctuaciones naturales que surgen de la naturaleza aleatoria de la señal que se está manejando. Hay que recordar que todo esto a lo que llamamos señal no es distinguible del ruido estadístico, o sea, no lleva ninguna información codificada de algún modo, como puede ser la voz en una comunicación. Al disminuirse las fluctuaciones naturales se ponen cada vez más de manifiesto las variaciones correspondientes a las radiofuentes débiles, que de otro modo serían totalmente confundidas con el ruido de fondo.

La adecuación de nivel no tiene otro propósito que poner la señal de salida dentro del rango del instrumento de medida que se utilice. Para dar una idea genérica, si suponemos que ruido de fondo hace subir el nivel de salida en 8 Volts, a esta tensión se sumará, cuando pase por delante del haz de la antena, la tensión producida por la verdadera radiofuente, que por ejemplo, puede ser de 0.5 Volts, con un resultado total de 8.5 Volts. Cuando la citada radiofuente salga del haz de la antena, la tensión caerá nuevamente a 8 Volts. Sin embargo estos 8 Volts no interesan en nuestro estudio radiastronómico, por ello, por medio del control de nivel, bajamos expresamente la tensión de salida en esos 8 Volts. Como resultado, solo "veremos" la radiofuente pasando por delante de la antena cuando la salida pase de cero a 0.5 Volts, y baje a cero al final de su paso.

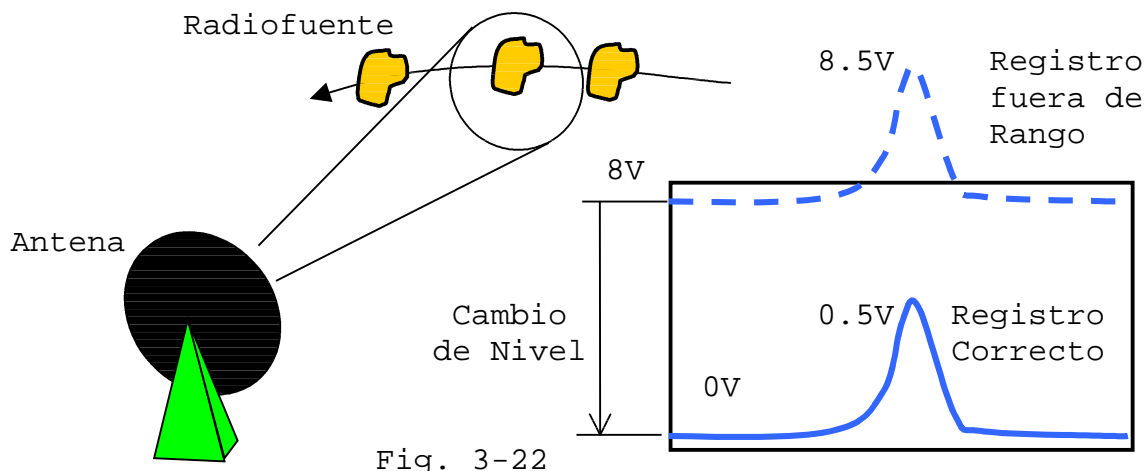


Fig. 3-22

La amplificación de continua tiene también el propósito de adecuar el rango de salidas a los valores de intensidad de los objetos que se desee investigar.

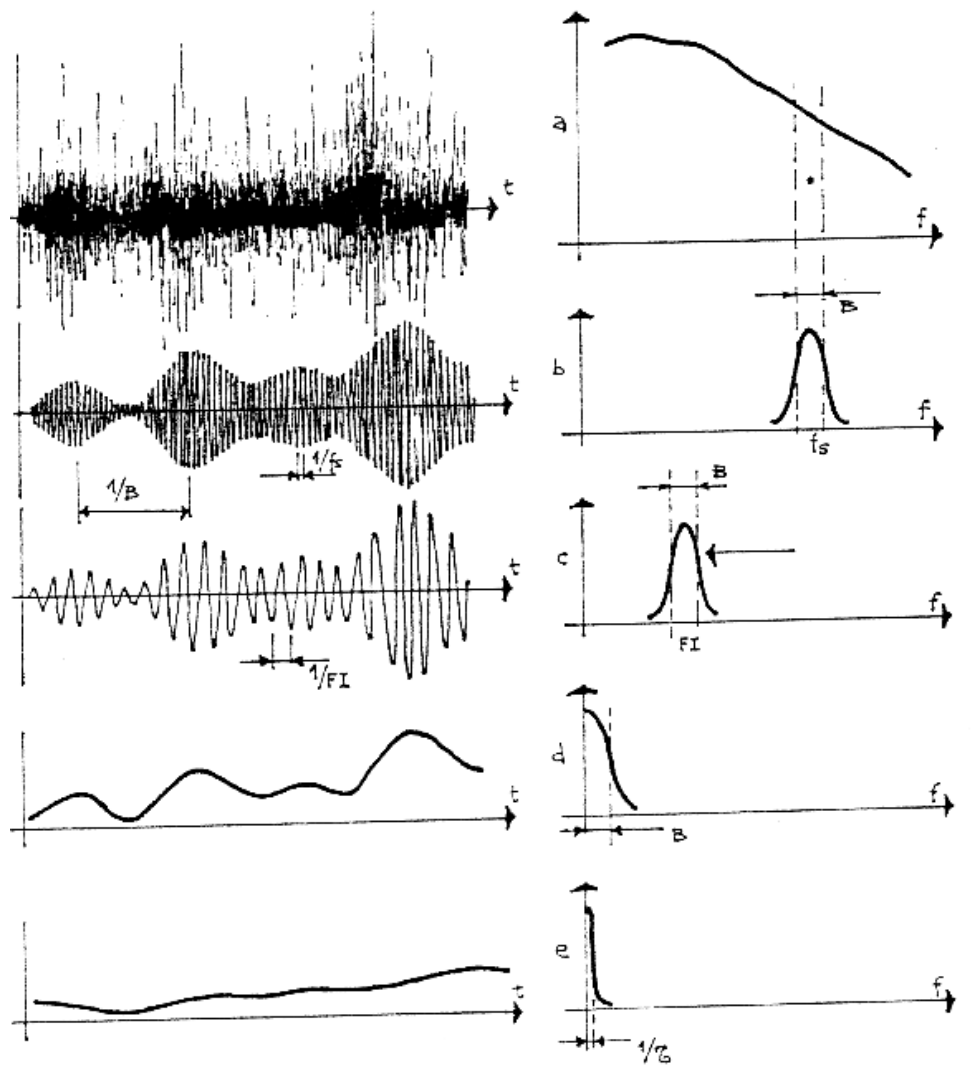
Ahora sí se mide la señal. Para ello se usa un arsenal de dispositivos según lo que se esté investigando.

Lo más tradicional es el uso de un registrador analógico de tira de

papel. Esto deja un registro permanente que sirve para posterior análisis. Justamente, para efectuar este análisis posterior, deben efectuarse precisas mediciones sobre el papel y transportarlas a mano a tablas de valores, trabajo que toma bastante tiempo y está propenso a errores.

Con la popularización de las PC's este trabajo se torna totalmente innecesario, pues con un Convertidor Analógico-Digital (ADC) y un programa adecuado, se puede hacer entrar los datos a uno o varios archivos de disco. Como en estos archivos los datos están en forma de números, quedan a disposición de otros programas analizadores que pueden tomarlos con muy poco trabajo humano.

El aspecto que posee la señal en cada etapa se muestra en el gráfico que sigue:



El radiotelescopio descrito es del tipo de Potencia Total. El nombre deriva de la causa de que el aparato mide toda la potencia que le ingresa sin hacer ninguna comparación con algún patrón de medida.

En este tipo de instrumento, una variación de la ganancia de las etapas amplificadoras redundará en una señal de salida similar a la producida por una radiofuente. La ganancia debería mantenerse estrictamente constante a fin de no incurrir en errores.

A fin de descartar los errores introducidos por las variaciones de la ganancia mencionados Dicke modificó el sistema como sigue:

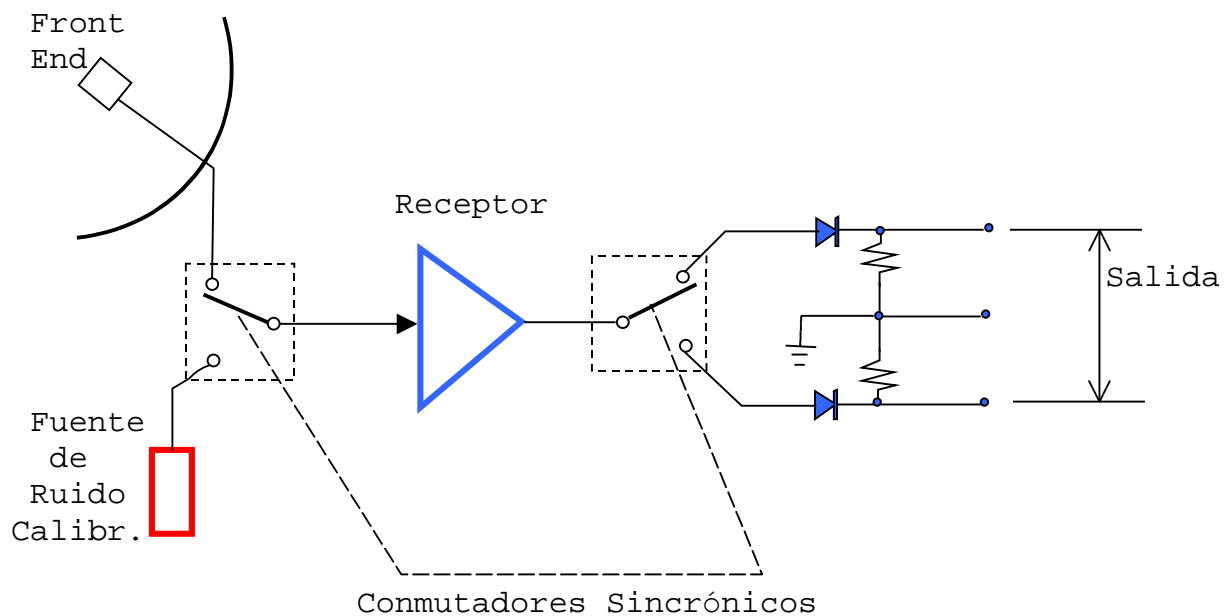


Fig. 3-24

Un doble conmutador cambia rápidamente la conexión de la entrada y la salida en forma sincrónica. La conexión hacia arriba deja el radiotelescopio como el de potencia total. La conexión hacia abajo pone en la entrada del receptor una fuente calibrada local de ruido.

El conmutador de salida hace de modo que la señal del instrumento de potencia total **se reste** de la de la fuente de ruido. Aquí se nota que cualquier variación en la ganancia de los amplificadores no se manifestará a la salida. La conmutación, en la práctica, se realiza a razón de unas 200 o 400 veces por segundo. La mayoría de los instrumentos profesionales tienen el sistema de Dicke.

Existen variaciones sobre el diseño básico de Dicke para tener en cuenta otros factores de variación que aún quedan por resolver pero la idea básica es la misma.

Veremos ahora con un poco más de detalle las secciones mencionadas antes de un típico radiotelescopio.

ANTENA

Hemos visto antes el diagrama de radiación de un dipolo y de una antena.

En él se distingue un lóbulo principal que generalmente está centrado con el eje de simetría de ella. Este lóbulo es el que presenta una de las características principales del dispositivo pues nos da, por un lado, la resolución angular y por otro lado la ganancia de la misma.

La fineza de este lóbulo está interrelacionado con esta ganancia, de este modo:

Cuanto más angosto es el lóbulo tanto mayor será la ganancia.

La ganancia de una antena puede definirse intuitivamente como la cantidad de veces que se multiplica la potencia de la radiofuente al observarla con ella. Para tener unas cifras de referencia, una Yagi típica multiplica por 10 la potencia de la fuente. La parábola de la Asociación, por unas 300 veces, y la del IAR, de 30 metros de diámetro, por una 15000 veces!

Sin embargo, por los costados de las antenas, siempre existen los que se llaman lóbulos laterales, que también se obtienen graficando el diagrama de radiación. Estos lóbulos laterales no significan otra cosa que la "habilidad" de la antena por captar señal que llega desde direcciones no apuntadas por ella. Esto significa que una antena que "mira" una radiofuente débil también estará captando energía desde fuentes fuertes fuera de su intención de observación. A la fuente débil la multiplica por su máxima ganancia pero a la fuente débil, en general y en promedio, la multiplica por, aproximadamente, 0.5. Puede resultar que la fuente débil se pierda completamente en el fondo de señal no deseado. También de aquí se deduce lo importante que es tener una antena de gran ganancia. Las "radiofuentes no deseadas" pueden ser el calor del suelo, las bujías de los autos, el sol, las emisoras de TV, los radioaficionados, etc.

Es importante, entonces, entender que una antena no "ve" solo la radiofuente apuntada, sin que "de reojo" también capta los costados, y esta última captación se suma a la de interés. Requiere gran habilidad y conocimiento de la naturaleza de cada interferencia, el eliminarla del registro. A veces existen características propias del "ruido de fondo" que lo distinguen del ruido de nuestra radiofuente,

y eso lo delata en un análisis de la señal. Cuando esto ocurre se puede eliminar su influencia, pero no siempre es el caso.

Respecto a la resolución angular o poder separador, se la calcula de igual forma que para los telescopios ópticos, y está dado por el ancho del haz de la antena. Este ancho de haz también se ve en el ancho del lóbulo principal de su diagrama de radiación. En primera aproximación es igual a la relación entre la longitud de onda λ , de las ondas empleadas y el diámetro del reflector parabólico.

Esto arroja resultados en radianes (1 radián = 57.3 °).

$$\text{Ancho de haz} = \theta \text{ (rad)} = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

o en grados

$$\theta \text{ (grados)} = 69.9 \frac{\lambda}{D}$$

λ y D medidos en las mismas unidades.

Existe una forma práctica de visualizar este ángulo, dibujando un segmento horizontal proporcional al diámetro de la antena. En un extremo del mismo y perpendicularmente a él, en escala, se dibuja otro proporcional a λ . Se unen los dos extremos restantes y el ángulo agudo resulta ser el 80% del ancho del haz.

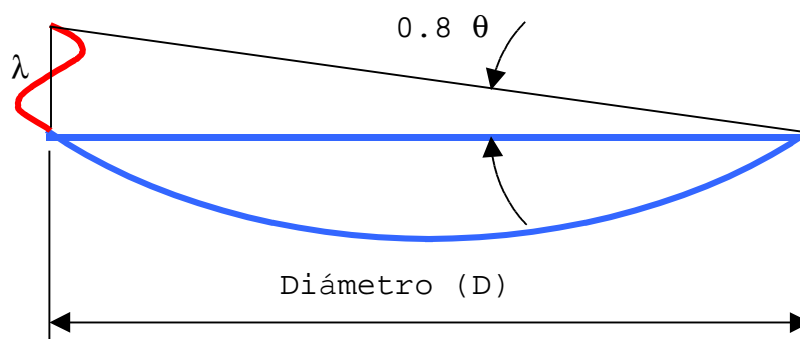


Fig. 3-25

Si la antena es de otro tipo (ej. Yagi, helicoidal, discos, etc), se usan otras consideraciones relacionadas al área colectora equivalente.

El área colectora equivalente de una antena es como sigue:

$$A_{eq} = G \frac{\lambda^2}{4 \pi}$$

donde $\frac{\lambda^2}{4 \pi}$ es el área equivalente de un radiador isotrópico.

y G es la ganancia de la antena. (para el r. isotróp. G=1)

y finalmente, el ancho del haz en radianes es:

$$\theta \text{ (rad)} = \sqrt{\frac{8}{G}}$$

Esta última es una fórmula aproximada. En caso de que sea necesario el conocimiento exacto del valor no puede prescindirse de la medición práctica. Como ejemplo, para una Yagi de ganancia G=10 será

$$\theta \text{ (grados)} = 57.3 \sqrt{\frac{8}{G}} = 51^\circ$$

Es útil la comparación de las resoluciones angulares obtenibles entre las antenas más grandes del mundo con los telescopios ópticos de aficionados, que pueden tener 20 cm de diámetro.

La antena de Arecibo, Puerto Rico, tiene 300 metros de diámetro y está instalada en una hoya natural entre montañas. Una de las frecuencias que opera es 1420 MHz, que da un λ de 0.21 metros, así:

$$\begin{aligned} \theta \text{ (Arecibo)} \text{ (rad)} &= 1.22 \frac{0.21 \text{ m}}{300 \text{ m}} = 0.000854 \text{ rad} \\ &= 2.94 \text{ minutos de arco} \end{aligned}$$

$$\theta \text{ (telescopio óptico)} = 1.22 \frac{0.56 * 10^{-3} \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 0.0000034 \text{ rad}$$

$$= 0.70 \text{ segundos de arco}$$

Vemos que la resolución angular de un modesto telescopio de aficionado supera por unas 300 veces al más grande de los radiotelescopios del mundo!

Sin embargo, mediante el uso de la interferometría, un tema que veremos luego, se ha podido llegar hoy a 5 milésimas de segundo de arco en radioastronomía. Esto sirvió para realizar importantes descubrimientos, especialmente en los núcleos de algunas galaxias activas.

En astronomía óptica también se supera día a día la marca de la resolución angular. El telescopio espacial Hubble llega hasta el décimo de segundo de arco, y ya se habla de resultados similares desde telescopios desde tierra (Keck, Hawaii) que utilizan una compleja técnica, llamada de óptica activa, con la que se deforma la superficie del espejo principal rápidamente para contrarestar el efecto distorsionador de la turbulencia en la atmósfera terrestre.

No siempre es buscada como característica primordial la alta resolución angular. Otra cualidad de importancia es el ancho de banda. En general, las antenas resonantes (dipolo, Yagi) son de ancho de banda estrecho. Las antenas de onda progresiva (rómicas, helicoidales, etc.) manejan un espectro de frecuencias más amplio, y por ello se las utiliza muy bien en ciertos proyectos.

Por ejemplo, en el estudio solar, se registran fenómenos transitorios durante las tormentas magnéticas desarrolladas en las áreas activas solares, donde habitan las manchas. Durante las mismas se emiten radiaciones que, al comienzo concentran su energía en las frecuencias elevadas (p. ej. 160 MHz). Con el transcurso de algunos minutos, el pico de energía se desplaza hacia frecuencias menores, dejando así una huella de comportamiento especial para ese tipo de fenomenología.

Se supone que la perturbación comienza en regiones profundas de la corona, desde donde solo pueden salir ondas de frecuencia elevada. La tormenta evoluciona hacia el exterior de la corona, donde la densidad electrónica disminuye haciendo que también disminuya la opacidad a las bajas frecuencias, las que así llegan a la tierra más tarde.