



## Proyecto Académico con el Radio Telescopio de NASA en Robledo

[Página principal](#)[El proyecto y sus objetivos](#)[Cómo participar](#)[Cursos de radioastronomía](#)[Material](#)[Novedades](#)

### FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LA RADIOASTRONOMÍA

[Índice](#)[Introducción](#)[Capítulo 1](#)[Capítulo 2](#)[Capítulo 3](#)[Capítulo 4](#)[Capítulo 5](#)

## CAPÍTULO 4. Comportamiento de la radiación electromagnética

### 1. Interacción de las ondas con la materia

#### 1.1. Reflexión

#### 1.2. Refracción

#### 1.3. Interferencia y difracción

#### 1.4. Rotación de Faraday

### 2. Efectos del movimiento y la gravedad

#### 2.1 Efecto Doppler

#### 2.2 Desplazamiento al rojo gravitatorio

#### 2.3 Lentes gravitatorias

#### 2.4 Velocidades superlumínicas



*Lentes gravitatorias. Cúmulo de galaxias 0024+1654.  
W.N. Colley y Turner (Universidad de Princeton), J.A.  
Tyson (AT&T Bell Labs) y NASA*



Hemos visto en el capítulo 3 cuáles son los mecanismos de emisión de la radiación electromagnética. En este capítulo veremos cómo afecta el medio y las condiciones de propagación a la radiación electromagnética.

### 1. Interacción de las ondas con la materia

#### 1.1 Reflexión

Las ondas de radio se comportan de la misma manera que el resto de las ondas electromagnéticas, es decir, siguen los principios de óptica que a todos nos resultan familiares. Cuando una onda incide sobre una superficie reflectante, ésta se comporta como un espejo, es decir, la

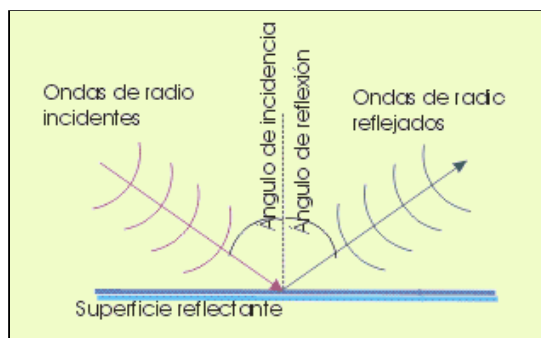


Fig.4.1. Reflexión de una onda

Sin embargo, para grandes antenas no es conveniente esta disposición de foco primario. El equipo que habría que colocar en el foco primario pesa tanto que deformaría la estructura global de la antena lo que, a su vez, afecta a la calibración. Una solución disponible para estos problemas consiste en colocar los receptores en el *foco Cassegrain*. Las antenas Cassegrain añaden un reflector secundario que concentra la radiación en un nuevo foco próximo al primer reflector (la superficie de la antena). De esta forma, el equipo pesado se encuentra siempre próximo al centro de gravedad de la antena y le confiere un mayor grado de estabilidad estructural incluso aunque se trate de una antena de gran apertura. Por esta razón, las antenas de la DSN (Red de Espacio Profundo) a la que perteneció la antena de PARTNeR son todas de tipo Cassegrain.

onda es reflejada formando un ángulo con la perpendicular a la superficie igual al ángulo incidente.

El principio de *reflexión* de las ondas se emplea en el diseño de antenas para dirigir la radiación y concentrarla en un receptor. Si el disco reflector de la antena se con forma de paraboloide, las ondas de radio procedentes del espacio que se propagan en direcciones paralelas, serán reflejadas de forma que acabarán confluyendo en un punto, por encima de la superficie del disco, en el que se coloca un receptor. En este tipo de diseño se dice que el receptor se halla en el foco primario y proporciona la máxima apertura para detectar señales débiles.

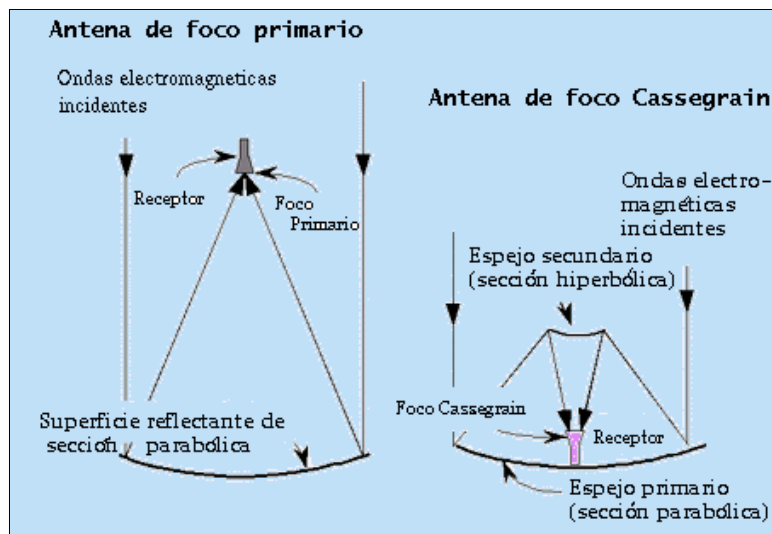


Fig.4.2. Antena de foco primario y antena de foco Cassegrain



## 1.2 Refracción

La *refracción* es un fenómeno que se produce cuando una onda pasa de un medio a otro. La velocidad de la luz en un medio ( $v$ ) es generalmente diferente a la velocidad de la luz en el vacío ( $c$ ). Se puede caracterizar un determinado medio por su *índice de refracción*:  $n=c/v$ . Según la Ley de Snell, la relación entre el ángulo de incidencia ( $i$ ) de una onda que se propaga en un medio con índice  $n_1$ , y el ángulo de refracción ( $r$ ) en un medio con índice  $n_2$  es:  $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ .

De esta forma, tenemos que si una onda se propaga en el vacío ( $n=1$ ) y pasa a propagarse en un medio, como por ejemplo el vidrio ( $n=1.5$ ), se producirá una refracción de manera que  $\sin i = 1.5 \sin r$ , como se puede ver en la siguiente figura.

Éste es un efecto que estamos acostumbrados también a ver en el óptico. Por ejemplo, cuando se sumerge una varilla recta o un lápiz en el agua se puede apreciar cómo da la impresión de estar quebrado, puesto que las ondas que atraviesan el agua pasan por un medio con distinto índice de refracción del que presenta el aire.

En general, el índice de refracción de un medio es distinto para longitudes de onda distintas. Es decir, luz de distintas longitudes de onda (o colores) es refractada a diferentes ángulos cuando la luz tiene el mismo ángulo de incidencia. Este efecto es el que se observa al hacer pasar un haz de luz a través de un prisma, por ejemplo, donde el hecho de que cada longitud de onda se refracte con un ángulo ligeramente distinto permite observar la luz descompuesta en sus diferentes longitudes de onda.

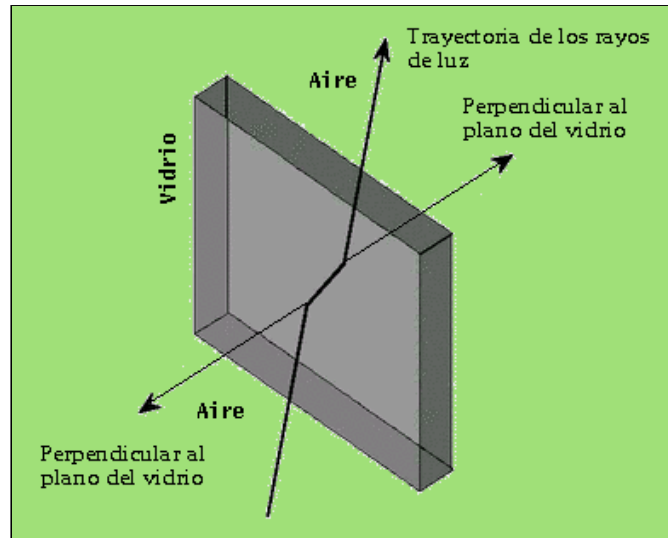


Fig.4.3. Refracción aire-vidrio-aire

De igual forma, las ondas electromagnéticas que penetran en la atmósfera procedentes del espacio sufren una ligera desviación debida a la refracción. La *refracción atmosférica*, que así se llama este fenómeno, es más importante cuando la fuente se encuentra próxima al horizonte (por debajo de  $15^\circ$ ) y el efecto es el de aumentar la altura aparente de la fuente. Si al rotar la Tierra el objeto gana altura, los efectos de la refracción disminuyen, hasta alcanzar un mínimo cuando el objeto culmina, es decir, alcanza la máxima altura sobre el horizonte. Si en algún momento, debido a su posición, el objeto pasase por el *cénit* (que es el punto más alto de la bóveda celeste y se encuentra justamente encima de nuestras cabezas- ver **Capítulo 5**) la refracción no afectaría en absoluto a la dirección de propagación de la onda.

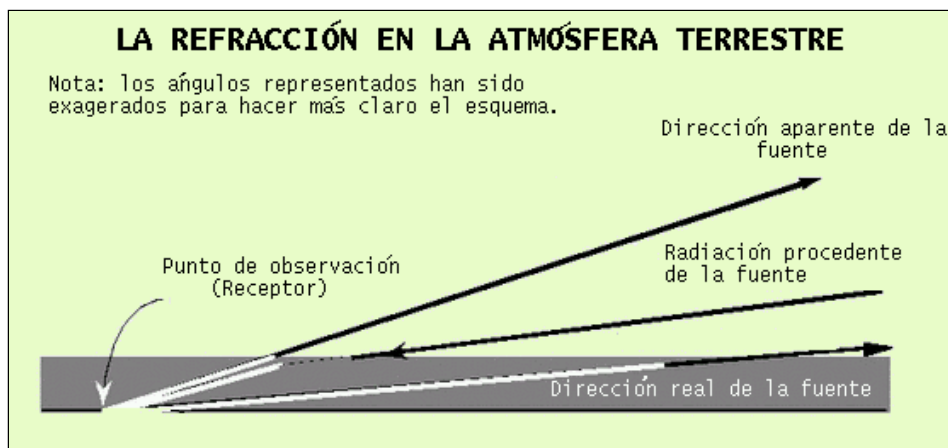


Fig.4.4. Refracción en la atmósfera

El aumento, debido a la refracción, de la altura aparente de un objeto hace que éste sea visible cuando en realidad se encuentra por debajo del horizonte. Este efecto hace, por ejemplo, que el día dure cinco minutos más en el ecuador.



### 1.3 Interferencia y difracción

Las ondas siguen el denominado *principio de superposición*, que afirma que cuando dos ondas se encuentran en el espacio se combinan en ese punto de encuentro, siguiendo posteriormente cada una de ellas su camino anterior sin producirse ninguna variación ni en su amplitud ni en su frecuencia ni en su fase.

La *fase* de una onda respecto a otra de la misma frecuencia es el alineamiento relativo de sus máximos y sus mínimos. Se dice que dos ondas están *en fase* cuando sus máximos y sus mínimos respectivos coinciden exactamente. Se dice que dos ondas están *desfasadas 180 grados* cuando el máximo de una coincide con el mínimo de la otra.

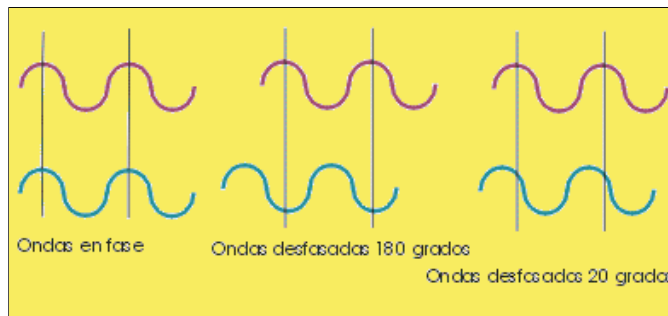


Fig.4.5. Fase de las ondas

Hemos visto que, si dos ondas coinciden en el espacio, su interacción permanece mientras dura esa coincidencia. Por tanto, si tenemos dos ondas superpuestas y viajando en la misma dirección, su interacción será permanente, produciendo lo que se denomina *interferencia*, y la onda resultante será la suma de las dos ondas iniciales.

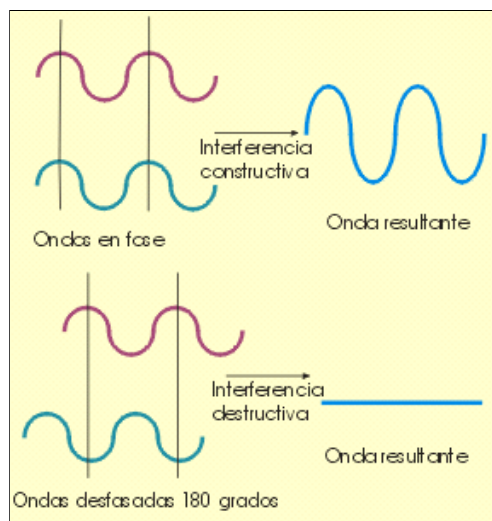


Fig. 4.6. Interferencia de ondas

Si las ondas tienen la misma frecuencia, y están en fase, se dice que su interferencia es *constructiva*, dando lugar a una onda resultante de la misma frecuencia cuya amplitud es mayor que las amplitudes de las ondas originales.

Si las ondas están desfasadas 180 grados, se dice que su interferencia es *destructiva*, ya que si sus amplitudes son iguales, la amplitud de la onda resultante es cero.

Esto, por supuesto, es una simplificación, porque supondría que la energía contenida en ambas ondas desaparecería. En realidad, no hay ondas infinitamente delgadas, por lo que al superponer dos ondas, se dan interferencias constructivas en unas zonas y destructivas en otras.

Si te interesa ver las fórmulas de propagación de las ondas y cuál es el resultado de su interferencia, pulsa [aquí](#).

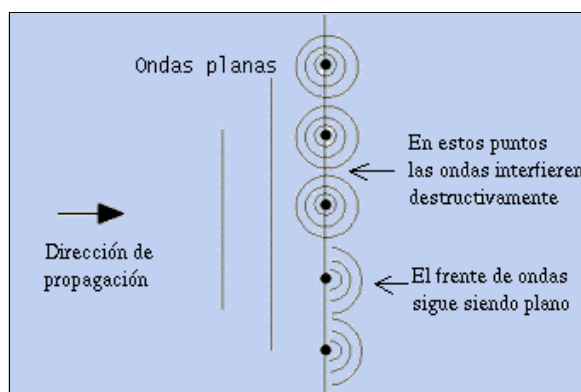
En [esta página](#) y en [ésta](#) se pueden ver ejemplos de superposición de ondas.

La interferencia tiene un papel muy importante en la *difracción* de las ondas. Cuando la radiación electromagnética encuentra un obstáculo a su paso, la dirección de propagación de los rayos próximos al borde del obstáculo sufre una desviación. La desviación es en general lo suficientemente pequeña como para que apenas nos demos cuenta de que ocurre. Éste es el fenómeno conocido como *difracción*.

Sin embargo, es sencillo comprobar sus efectos sin más que colocar dos dedos frente a una fuente de luz a una distancia de unos 10 cm de nuestros ojos, y aproximarlos uno a otro hasta que se encuentren a 1 mm aproximadamente. Con un ligero ajuste de esta distancia podremos observar franjas claras y oscuras debidas a la interferencia (constructiva y destructiva) de las ondas que sufren difracción al pasar entre los dedos.

La razón por la que ocurre la difracción no es obvia. Christian Huygens hacia la mitad del siglo XVII, propuso una teoría que, aunque parezca extraño, todavía explica bastante bien las observaciones. Podemos suponer que la radiación electromagnética se propaga como ondas planas (la figura que ilustraba el fenómeno de la refracción representaba la radiación como ondas planas). Huygens supuso que ese caso es equivalente a tener, en cada punto del frente plano, una fuente de ondas que se propagan en todas direcciones. Las ondas dirigidas hacia los lados se anulan con las emitidas por los puntos vecinos del frente de forma que la onda sigue siendo plana.

Si, bajo estas hipótesis, la onda encuentra un obstáculo, los



puntos situados junto a su borde van a emitir ondas que no se ven contrarrestadas en los laterales produciendo así el efecto aparente de desviar la dirección de propagación.

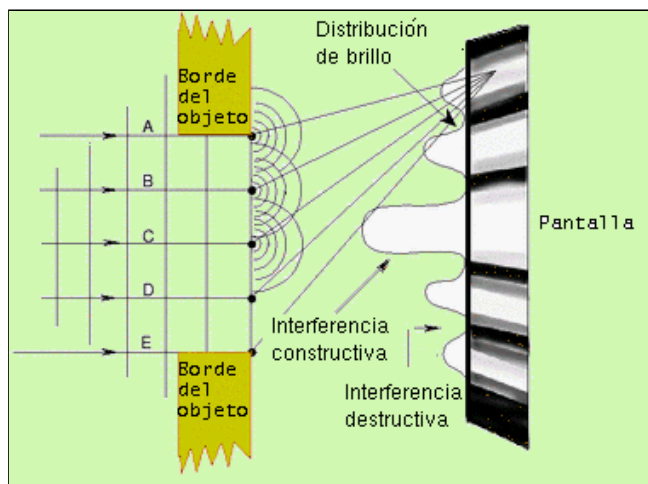


Fig.4.8. Interferencia

Las consecuencias que implica la difracción son importantes, tanto para los telescopios que operan en el rango óptico como para los radiotelescopios, ya que la difracción que se produce en los bordes de la apertura de un telescopio limita su poder de resolución. En radio, el hecho de que las longitudes de onda sean mayores, implica que las figuras de difracción (los patrones de bandas brillantes y oscuras alternadas) son de mayor tamaño, empeorando así la resolución de las imágenes. Este efecto puede ser atenuado si observamos con radiotelescopios de gran tamaño o empleando conjuntos interferométricos.

La imagen que se muestra a continuación representa un patrón de difracción típico de una estrella, obtenido al enfocar los rayos de luz en un punto mediante un telescopio óptico de lente convergente.

Fig.4.7. Frente de ondas plano

Supongamos que un cierto tipo de radiación electromagnética (por ejemplo, luz visible) es bloqueada por una superficie (llamémosla pantalla) poco después de haber pasado por el obstáculo, como en la figura de la izquierda.

Entonces, dado un punto de la pantalla, la distancia recorrida por las ondas producidas en los bordes del obstáculo (ondas A y E en el esquema) será distinta (mayor o menor) que la recorrida por las que lo atraviesan (B, C y D).

El resultado es que, en algunos puntos de la pantalla, las ondas que se superponen están desfasadas unas respecto a otras, mientras que a otros puntos llegan en fase. En estos últimos se producirá una interferencia constructiva que dará lugar a una región iluminada; por el contrario, en los puntos a los que llegue radiación con diferencias de fase de 180 grados se producirá una interferencia destructiva y quedarán, por lo tanto, sin iluminar.

Los efectos de la difracción son más visibles si la luz que produce el fenómeno es monocromática, esto es, si está compuesta de ondas de la misma frecuencia.

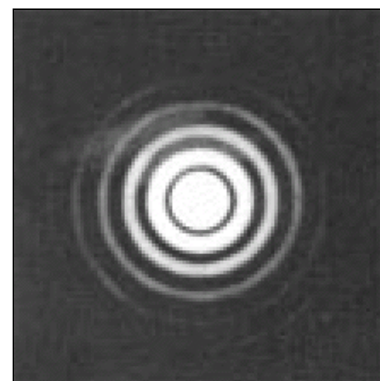


Fig.4.9. Patrón de difracción de una estrella con un telescopio óptico



## 1.4 La rotación de Faraday

El campo magnético también puede influir sobre las ondas electromagnéticas. Cuando una onda linealmente polarizada (es decir, en la que el campo eléctrico y el magnético oscilan en un plano -ver **Capítulo 1**) se propaga en presencia de un campo magnético, se produce un cambio en el plano de polarización, como se puede ver en la figura.

Una onda polarizada linealmente se puede analizar como la suma de dos ondas de la misma frecuencia, polarizadas circularmente en sentidos opuestos. Al atravesar una región con campo magnético, las velocidades de propagación de



las dos componentes cambian (una de ellas se adelanta respecto de la otra) produciendo una rotación del plano de polarización de la onda compuesta. Este efecto se puede utilizar para calcular la densidad del plasma.

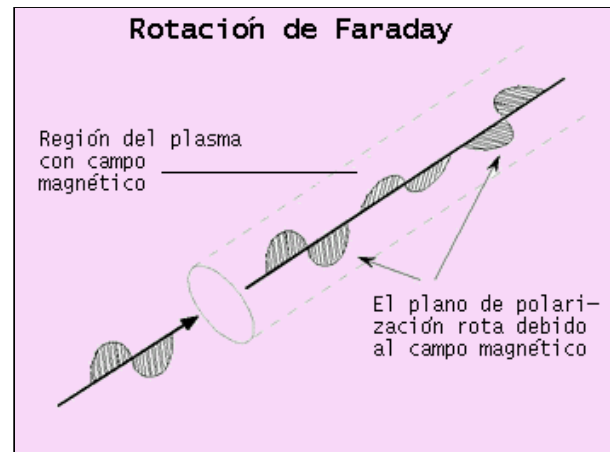


Fig.4.10. Efecto Faraday



## 2. Efectos del movimiento y la gravedad

### 2.1 Efecto Doppler

El *efecto Doppler* consiste en una variación aparente en la longitud de onda (y frecuencia) de una onda cuando existe un movimiento relativo entre el emisor y el observador.

Este efecto se produce también con las ondas sonoras, y es el causante de que cuando un coche con una sirena se acerca a nosotros, oigamos el sonido más agudo (la longitud de onda se acorta) y cuando se aleja, el sonido sea más grave (la longitud de onda se alarga).

En la figura podemos ver un ejemplo de este efecto. Si un cuerpo emite una onda a una determinada frecuencia (o longitud de onda) y este cuerpo se aleja de nosotros, la radiación que nos llegará tendrá una frecuencia menor que la emitida realmente. Por eso se dice, en este caso, que se produce un *desplazamiento al rojo* de la radiación. Sin embargo, si el cuerpo se está acercando, lo que apreciaremos será un aumento de la frecuencia, produciéndose, por tanto un *desplazamiento al azul*.

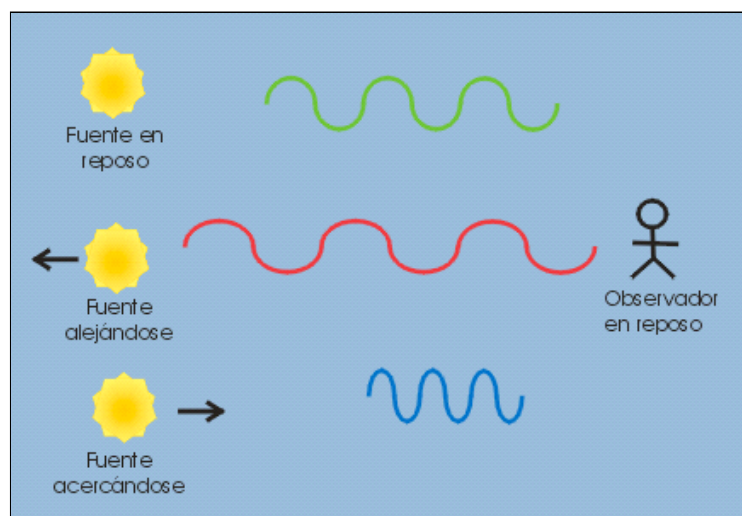


Fig.4.11. El efecto Doppler

El efecto Doppler es muy importante tanto en astronomía óptica como en radioastronomía. Cuando se toma un espectro de un objeto que se está alejando de la tierra, sus líneas aparecen desplazadas hacia longitudes de onda mayores (frecuencias menores), una cierta cantidad dependiendo de cuál sea la velocidad con la que se aleja. Esto es muy importante, por ejemplo, cuando se quiere hacer el espectro de una sola línea. Veamos la figura. Muestra un espectro de un máser de agua tomado con la antena de 70 m de Robledo. La línea está desplazada de su

posición de reposo, ya que, como se puede ver, se mueve a una velocidad algo mayor de 20 km/s. Esto hace, que en lugar de aparecer centrada en la frecuencia adecuada, aparece desplazada aproximadamente 1.5 MHz. Si nuestro espectrómetro tuviera una anchura de menos de 3 MHz, (si tuviera la anchura marcada por la línea azul) no podríamos ver el máser porque se quedaría fuera de nuestro rango de observación. Por eso, en estos casos, es importante conocer a priori las velocidades de los objetos cuyos espectros queramos tomar.

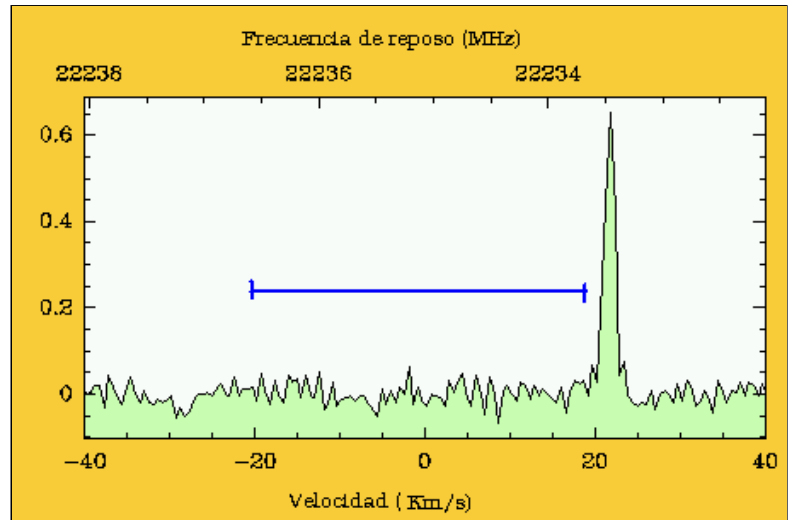


Fig.4.12. Máser desplazado por efecto Doppler

En el Universo, la mayoría de los objetos se están alejando unos de otros. Este hecho fue descubierto en los años 20, después de que Hubble confirmase que las galaxias no pertenecían a la Vía Láctea, sino que eran objetos lejanos y diferenciados. A partir de entonces comenzaron a realizarse medidas, descubriendo que cuanto más lejos estaba una galaxia, a más velocidad se alejaba de nosotros. Este hecho confirmaba la teoría de un Universo en expansión y se estableció la *constante de Hubble* que relaciona la distancia con la velocidad de expansión de un objeto. Éste es uno de los temas abiertos en cosmología, ya que dependiendo del valor de esta constante podremos tener un Universo que continúe indefinidamente su expansión, uno que atravesase después una fase de contracción o uno en el que la expansión vaya ralentizándose cada vez más sin llegar nunca a la contracción.



Fig.4.13. Representación de la separación de galaxias al expandirse el Universo

Debido a la expansión del Universo, la mayoría de los objetos que podemos observar, sobre todo aquellos que se encuentran fuera de nuestra Galaxia, están alejándose de nosotros, por lo que veremos sus espectros desplazados al rojo. A este efecto se le denomina *desplazamiento al rojo cosmológico*.

En la figura se representa un universo (la línea amarilla) en expansión. Supongamos dos galaxias entre las que existe una distancia A. Si imaginamos que las galaxias no tienen ningún desplazamiento propio y que su único movimiento es debido a la expansión del punto en el que están fijas, vemos que al expandirse el universo, la distancia que habrá entre ellas será B, que es mayor que A. La impresión que tendrá un habitante de una de estas galaxias es que la otra se está alejando de ella.

El espectro de los cuásares, por ejemplo, está considerablemente desplazado al rojo. Junto con otras características, como su gran energía, este desplazamiento al rojo sugiere que los cuásares son los objetos más distantes y más antiguos que hemos observado. ¡Los cuásares más lejanos se alejan a una velocidad del 90% de la velocidad de la luz!



## 2.2 Desplazamiento al rojo gravitatorio

El *desplazamiento al rojo gravitatorio* tiene lugar cuando la radiación se escapa de una atracción gravitatoria. La razón por la que ocurre es la misma por la cual los proyectiles disminuyen su velocidad cuando se elevan, porque tienen que transformar su energía cinética en la energía potencial que adquieren al ganar altura.

Los fotones no pueden disminuir su velocidad, ya que ésta siempre debe ser igual a la velocidad de la luz  $c$ , así que para liberar energía cinética cuando ha aumentado su energía potencial, lo que hacen es disminuir su frecuencia. Como una disminución de frecuencia supone un alargamiento de la longitud de onda, el resultado final es un enrojecimiento denominado *desplazamiento al rojo gravitatorio*. Ocurre un proceso similar cuando un fotón cae a un pozo gravitatorio,

para aumentar su energía cinética aumenta su frecuencia y se desplaza hacia el azul.



### 2.3 Lentes gravitatorias

La teoría general de la relatividad de Einstein predice que el espacio se distorsiona alrededor de los objetos masivos. En 1979, los astrónomos observaron dos cuásares notablemente similares muy cercanos. Tenían la misma magnitud, espectro y desplazamiento al rojo. Resultaba asombroso que dos imágenes tan similares representaran objetos distintos. Se concluyó la existencia de una galaxia directamente en el camino entre los dos cuásares y la Tierra, pero mucho más cerca de ésta.

La galaxia curva el espacio de manera que la luz procedente del cuásar tiene dos posibles caminos para llegar a la Tierra. Así, recibimos la imagen doble del cuásar como si estuviese mucho más cerca de lo que en realidad se encuentra. La galaxia está actuando de la misma manera que lo hacen las lentes ópticas, ampliando y acercando la imagen de un objeto, con la peculiaridad de que las lentes gravitatorias pueden producir más de una imagen del mismo objeto.

Gracias a las lentes gravitatorias se pueden estudiar objetos tan lejanos que no podrían ser observados de otra manera. Estos estudios están ayudando a confirmar o rechazar teorías de evolución del Universo, ya que los objetos más lejanos son también los más antiguos.

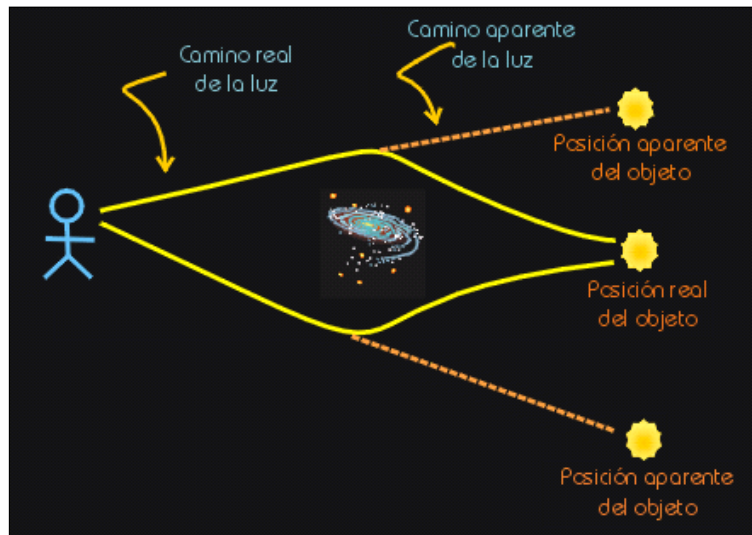


Fig.4.14. Lente gravitatoria



### 2.4 Velocidades superlumínicas

En los años 70 se descubrió, mediante observaciones de radio de alta resolución, que existía un cuásar: 3C345 que tenía dos "puntos calientes" de emisión de radio que en observaciones hechas entre 1969 y 1976 se movían aparentemente a una velocidad superior a la de la luz. Este hecho dejó atónitos a los científicos, que pronto encontraron una explicación que demostraba que en realidad no se estaba violando la relatividad de Einstein, sino que lo que se estaba observando era un efecto del punto de vista del observador.

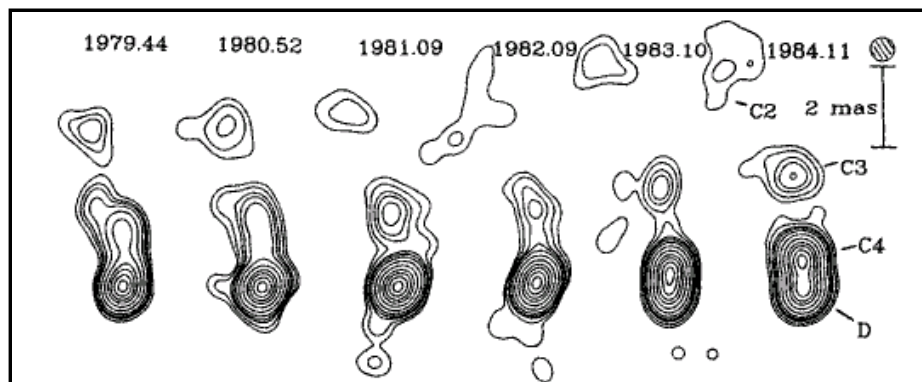


Fig.4.15. Imágenes del cuásar 3c345 tomadas a lo largo de 5 años donde se aprecian los tres chorros que se mueven a una velocidad aparentemente superlumínica. Cortesía de John Biretta/Space Telescope Science Institute.

Veamos cómo puede ocurrir este efecto: supongamos un objeto que se mueve formando un ángulo determinado con el observador. En un momento, el objeto está en el punto A y emite una cantidad de radiación en un instante que



llamaremos  $T_a$ .

Supongamos, que, mientras tanto, el objeto se desplaza de A a C con velocidades relativistas, es decir, muy próximas a la velocidad de la luz, por lo que tardará aproximadamente 5 años en encontrarse en la posición C (la distancia entre A y C es de 5 años-luz). La radiación que emita el objeto desde C, habrá salido cinco años más tarde que la que salió de A. Sin embargo, el punto C está más cerca de nosotros que A, por lo que la luz que se emita desde aquél tardará menos en llegar a nosotros.

El punto B está situado a la misma distancia de la Tierra que C. Por tanto, la luz emitida en A tiene que recorrer los 4 años luz adicionales que hay entre A y B. Si la luz tarda en llegarnos un tiempo  $t$  desde B y C, entonces la radiación que ha salido de A llega a la Tierra en el instante  $T_{A\text{total}} = T_a + 4 + t$ . Y la radiación que ha salido desde C llega a la Tierra en un instante  $T_{C\text{total}} = T_a + 5 + t$ . Entonces, la radiación procedente de C será recibida en la Tierra sólo un año después de haber recibido la de A, mientras que, aparentemente, en ese año la fuente parecerá haberse movido de B a C (los objetos en el cielo parecen todos situados sobre el mismo plano), es decir, se habrá movido una distancia de 3 años-luz en 1 año. Se ha medido, por tanto, una velocidad aparente mayor que la de la luz, pero, como hemos visto, esto es sólo un efecto de la proyección.

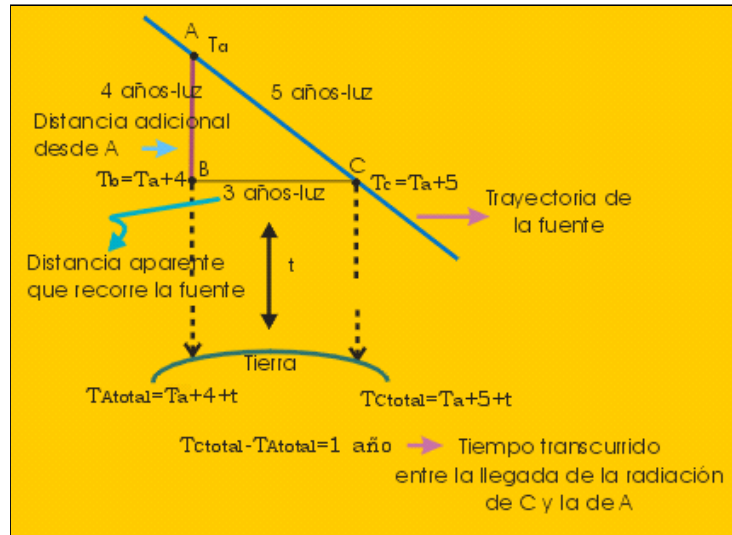


Fig.4.16. Velocidad superlumínica

