

La radiación láser. Primera parte: aplicaciones en la astrofísica

Eduardo J. Quel y Pablo Ristori

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951 (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

equel@frba.utn.edu.ar

Recibido el 1^o de agosto de 2022, aprobado el 17 de agosto de 2022

Resumen

Se describen las ideas que llevaron al descubrimiento y utilización de la emisión estimulada y al desarrollo del primer láser en 1960, así como los más utilizados en la ciencia y tecnología. Se analizan los láseres de origen natural observados por primera vez en 1963 en el espacio. También la utilización en 2015 de un interferómetro láser para la detección de las ondas gravitacionales, predichas teóricamente por Einstein unos cien años antes, así como los intentos que se realizan para el estudio de la materia oscura.

PALABRAS CLAVE: LÁSER - LÁSERES NATURALES - ONDAS GRAVITACIONALES - MATERIA OSCURA

Abstract

The ideas that led to the discovery and use of stimulated emission and the development of the first laser in 1960 are described, as well as the most widely used in science and technology. Naturally occurring lasers first observed in 1963 in space are analyzed. Also the use in 2015 of a laser interferometer for the detection of gravitational waves, theoretically predicted by Einstein a hundred years earlier, as well as the attempts made to study dark matter.

KEYWORDS: LASER - NATURAL LASERS - GRAVITATIONAL WAVES - DARK MATTER

Introducción

Max Planck en el año 1900 logró deducir la fórmula que explicaba correctamente la distribución espectral de la radiación térmica que había sido ya obtenida experimentalmente (Planck, 1900). Dicha fórmula implicaba el concepto del “cuanto” de energía, que aparecía por primera vez. El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Heinrich Hertz en 1887. En 1905, Einstein lo explicó magistralmente, para lo cual introdujo por primera vez la noción de fotón para el cuanto de energía de la luz (Einstein, 1905). Hacia 1911 Niels Bohr presenta el primer modelo atómico y los mecanismos sobre la absorción y la emisión de la luz por parte de los átomos utilizando el concepto de fotón. Pero en su idea había una sola forma de emisión de luz.

Einstein en 1917 se propone volver a demostrar la exitosa fórmula de Planck, pero utilizando las ideas de Bohr de absorción y emisión de la luz. Percibe que para ello tenía que introducir una nueva forma de emisión de la luz por parte de los átomos, a la cual denomina emisión estimulada. De no hacerlo, no era posible demostrar de esta forma la ley de Planck (Einstein, 1917). O sea que la emisión estimulada aparecía por primera vez, y esto se producía como consecuencia de un simple cálculo. Y a la emisión que Bohr propuso en su modelo atómico, Einstein la denominó espontánea.

Quedaba ahora por saber si realmente existía en la naturaleza, caracterizarla y estudiar las diferencias entre dicha emisión estimulada y la emisión espontánea. Los trabajos más importantes al respecto fueron realizados tiempo después por Fuchtbauer y Landeburg quienes encontraron y caracterizaron la emisión estimulada. Es interesante sumar los trabajos de Enrique Gaviola, físico argentino, que realizó contribuciones a la mejor comprensión de la emisión espontánea (Gaviola, 1927 y 1928).

En 1940, Fabrikant propone por primera vez la idea de que, si se lograba invertir la población entre dos niveles, podría tener como consecuencia la amplificación de la radiación estimulada (Fabrikant, 1940). El tema volvió a aparecer unos años más tarde, cuando C. Townes y sus colaboradores, lograron un emisor de radiación estimulada en la zona de las microondas que bautizaron con el acrónimo “máser” proveniente de la frase “microwaves amplification by stimulated emission of radiation” (Gordon, *et al.*, 1954). El elemento usado fue el amoníaco, en el cual lograron una inversión de población en los niveles rotacionales y con un resonador acoplado a la radiación estimulada que se producía, lograron que el sistema fuera un amplificador de dicha radiación. La emisión resultó ser muy intensa, y a diferencia de otros emisores era muy coherente, en un ancho de banda muy estrecho. Por primera vez se había logrado un emisor en base a la emisión estimulada.

Es muy importante señalar que aquí se mencionaron los trabajos considerados más significativos en cada tema, pero la literatura en general es abundante, con contribuciones que han resultado valiosas.

Poco tiempo después, surgió el objetivo de aplicar las mismas ideas para lograr un emisor similar, pero en la zona óptica del espectro electromagnético. Schawlow y Townes (1958) publicaron un artículo en el cual dieron las ideas básicas para obtener emisión estimulada en la zona del espectro visible con dicho tipo de emisor. Casi en simultáneo, poco después, los rusos Basov y Prokhorov, publicaron ideas similares. Se inició así una actividad notable para lograr el primer equipo que emitiera esta radiación. Y el 16 de mayo de 1960 T. Maiman logró el primer emisor de radiación estimulada en la zona óptica del espectro electromagnético, más precisamente en 694,3 nm, en base al rubí sintético como material con el cual se obtuvo la amplificación de la luz, utilizando un resonador. Fue el primer emisor de radiación estimulada experimental en la zona óptica (Maiman, 1960). Se comenzó a utilizar el acrónimo láser, donde la primera letra era por la palabra en inglés *light*, o sea luz. El resto de la frase era igual a la que daba lugar al anterior acrónimo. Fue

el origen de una nueva línea de trabajo sumamente activa en investigación y desarrollo, y obviamente sus numerosas aplicaciones en múltiples campos de la ciencia y la tecnología.

En nuestro país, se comenzó a trabajar institucionalmente sobre el tema láser hacia 1965 en las Facultades de Ciencias Fisicomatemáticas de la UNLP y de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UBA, y en el Grupo Láser de CITEFA. Con el tiempo, se fueron sumando otros laboratorios de organismos oficiales, y además el uso de los láseres aumentó en forma notable.

Es interesante destacar que la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Unesco, organismo especializado de las Naciones Unidas, proclamó el 16 de mayo como Día Internacional de la Luz. Estos trabajos dieron lugar a varios premios Nobel que les fueron otorgados a Max Planck en 1918 por la fórmula ya mencionada; a A. Einstein en 1921, por la explicación del efecto fotoeléctrico y contribuciones a la relatividad; a N. Bohr en 1922, por el modelo atómico y la generación y absorción de fotones a través de las transiciones y en 1964 a Townes, Basov y Prokhorov, por sus trabajos sobre el máser y el láser.

Un evento muy comentado y analizado dentro de la historia del láser, ha sido sin duda el tema de las patentes y los serios problemas legales y las graves disputas que se suscitaron. Gordon Gould, fue un científico norteamericano, que luego de graduarse, participó un tiempo en el proyecto Manhattan sobre la bomba atómica, entre 1944 y 1945, el cual fue obligado a abandonar por sus ideas políticas. A partir de 1949 se dedicó a realizar su tesis doctoral en la Universidad de Columbia dirigida por el premio Nobel Polikarp Kusch (1955) que lo obtuvo por “determinar el momento magnético del electrón”. El tema de la tesis era el bombeo óptico, y en 1956 G. Gould propuso utilizarlo para bombear un máser óptico, todo lo cual llegó a conversarlo con C. Townes y con su conocimiento y apoyo, realizó más tarde en 1959 una presentación en la oficina de patentes de EE.UU., sobre la cual hay un registro notarial previo que lo atestigua. Ahí fue donde utilizó por primera vez el acrónimo láser. Pero unos meses antes dicha oficina de patentes, ya había recibido de los laboratorios de la Bell otra solicitud a nombre de Schawlow y Townes. Se registraron numerosas patentes en temas vinculados al láser y sus aplicaciones. Transcurrieron unos 30 años de largos procesos, y disputas legales, hasta que finalmente se fueron concluyendo, después de pasar por las más altas autoridades de EE.UU., y le fueron otorgadas a Gould varias patentes sobre el láser, y otras por supuesto, a Townes y Schawlow. También Gould obtuvo varias patentes en otros países del mundo. Todo esto llevó a complicar la autoría sobre el verdadero inventor del láser y de algunos temas conexos, lo cual aún hoy sigue vigente, tal como lo muestra la literatura al respecto.

El láser: descripción

Un láser consta de tres partes fundamentales: a) el material que genera la radiación láser que puede ser sólido, líquido o gaseoso, b) el sistema que genera la excitación de dicho material para producir la emisión estimulada correspondiente, y c) la cavidad resonante formada por un par de espejos, donde oscila dicha radiación para amplificarse. La emisión estimulada producida por la oscilación que saldrá a través de uno de los espejos de reflectividad menor que 100%, constituirá la llamada radiación láser, que tendrá propiedades notables. (Quel y Rosito, 1995)

Se ha logrado emisión láser en una importante cantidad de materiales, que se pueden presentar, tal como se dijo, como sólidos, líquidos o gaseosos. Son numerosos, pero cabe señalar que algunos de ellos ofrecen dificultades y necesitan de tecnologías complejas para lograr la emisión láser, en tanto que otros pueden ser utilizados en formas más simples. Varios de estos materiales han llegado a ser comerciales.

Una primera idea que se debe mencionar es la “inversión de la población” en un dado

material, la cual permite la emisión estimulada. Para ello es deseable que entre dos de los niveles disponibles en el material, el nivel superior tenga una vida media mayor que el inferior. Inicialmente se consideraba al nivel superior con una vida media “infinita”, es decir de transición prohibida. Pero al lograr la inversión, se estimulaba la emisión, y de ahí la amplificación de dicha radiación al ir recorriendo la emisión estimulada el material.

La inversión de la población se logra mediante el proceso de “bombeo” por el cual se “puebla” más el nivel superior a partir de otro nivel que permite suministrar dicha población. Este proceso se realiza sobre el material elegido mediante la inyección de radiación proveniente de una fuente adecuada. El bombeo se puede efectuar de muy diversas formas, tales como óptico, electrónico, térmico, químico y otros más. La condición es que en su espectro de emisión se disponga de las longitudes de onda apropiadas para poblar el nivel superior y alcanzar así la inversión de la población. Es decir que el nivel superior alcance una población mayor al nivel inferior; de forma tal que entre esos dos niveles no se cumpla la ley de distribución de Boltzmann. Entonces un láser involucra a tres o cuatro niveles de energía en el material. También existen sistemas donde se logra aumentar la población del nivel superior por medio de una transferencia de energía resonante entre dos moléculas diferentes. Al lograrse así la inversión, se produce la emisión estimulada, a partir de primeras emisiones que pueden provenir de la emisión espontánea. Si consideramos que la emisión espontánea es el “ruido” de las señales de emisión estimulada, se podría afirmar que el láser emite una radiación que se origina en el ruido.

En 1927, Fuchtbauer y Ladenburg, a partir de la fórmula de Planck, de la noción de fotón, del modelo de Bohr, de la demostración de Einstein sobre la existencia de la emisión estimulada y utilizando una expresión similar a la ley de Beer-Lambert para la absorción de la radiación por parte de un medio dado, desarrollaron una expresión para la amplificación de la radiación. En este caso el coeficiente de absorción se transforma en un coeficiente de amplificación.

Caracterizaron así este fenómeno con el factor de amplificación de la radiación que depende directamente de la inversión de la población entre los dos niveles involucrados (Quel y Rosito, 1995):

$$\alpha(\nu) = \frac{h\nu}{c} B_{21} (N_2 - N_1) g(\nu)$$

donde:

h es la constante de Planck,

c la velocidad de la luz,

y $\Delta\nu$ son la frecuencia de emisión a la cual se trabaja y el ancho de banda de la línea de emisión respectivamente,

B_{21} el coeficiente de Einstein de emisión estimulada, y $N_2 - N_1$ la diferencia de poblaciones entre los niveles superior e inferior simbolizados con 2 y 1. Se debe remarcar que además de estos dos niveles, involucrados en la emisión estimulada, debe existir un tercer nivel a partir del cual se bombea radiación para poblar el nivel superior 2. El factor

$$g(\nu) \approx \frac{1}{\Delta\nu}$$

corresponde al ensanchamiento estimado $\Delta\nu$ de la línea de emisión del material que se ha elegido para lograr la emisión estimulada. Tiene en cuenta el hecho de que las emisiones no se producen en una sola frecuencia, sino que lo hacen dentro de un ancho de banda.

La emisión láser

Esta radiación que comienza a recorrer el material en el eje del mismo, se va amplifi-

cando. Y a los efectos de que dicha amplificación llegue a la saturación, se coloca en los extremos un par de espejos, como se dijo arriba, que constituyen la tercera parte del láser, y que es la cavidad resonante. Uno de ellos, el trasero, reflejará el 100% de la radiación que llega y la reenvía al material. El otro, que oficia de espejo delantero, reflejará un porcentaje menor, a los efectos de que parte de la radiación pueda atravesar el mismo, y sea lo que constituye la emisión del láser. El porcentaje de la radiación emitida, está vinculado a la ganancia del láser y a las pérdidas del sistema, y de ahí el número de oscilaciones que deberá hacer la radiación para poder destinar parte de ella a la emisión.

Por otro lado, se produce también un proceso de estrechamiento espectral, debido a que la radiación viaja en un medio amplificador, donde se cumple que:

$$I(v, x) = I_o(v, o)e^{\alpha(v)x}$$

Dado que el coeficiente de amplificación α **a** (**n**) v depende de v , y dado que es mayor en el centro que en las alas, se producirá un efecto de estrechamiento espectral, según la expresión de arriba por efecto de la misma amplificación. El valor en el centro irá aumentando más que el valor en las alas. Es así que los láseres emiten potencias lumínicas importantes, con un ancho de banda muy estrecho.

La cavidad resonante clásica está constituida por un par de espejos, colocados cada uno en los extremos del láser, que están perpendiculares al mismo y paralelos entre sí, con el fin de que la radiación oscile entre ambos. Uno de los espejos es de muy alta reflectividad ($R \cong 100\%$) y el otro con $R < 100\%$, o sea semitransparente, por el cual emitirá la radiación.

Se producirán así modos de oscilación longitudinales, debido a las ondas estacionarias de propagación axial, y transversales, que se pueden producir si la propagación fuera en parte no axial.

Las cavidades estables de longitud L , pueden ser de distintas geometrías y los espejos planos o curvos con diferentes radios de curvatura R que cumplen características tales que dan lugar a las cavidades llamadas: a) plano-plano con dos espejos de radio de curvatura $R = \infty$; b) de tipo confocal o concéntrica, con dos espejos curvos de radios de curvatura R_1 y R_2 y c) las llamadas semifocal y semiconcéntrica con un espejo curvo de radio R_1 y otro plano de radio $R = \infty$, respectivamente. La separación en frecuencia de los modos longitudinales es:

$$\Delta v = c/2L.$$

También se pueden producir oscilaciones en cavidades inestables especiales, en determinadas circunstancias.

Los modos transversales pueden existir para láseres de sección rectangular o bien circular. En ambos casos se denominan $TEM_{m,n}$ pero los subíndices m y n , con significados geométricos diferentes.

Se denominarán M_1 y M_2 a los espejos que van en los extremos de láser; R_1 y R_2 , a sus respectivos radios de curvatura, y z_1 y z_2 a las distancias de los centros de dichos espejos a la posición del ancho mínimo del haz oscilante en el eje del láser, también llamado la "cintura" del haz. Tiene un radio w_0 , y además w_1 y w_2 serán los radios del haz sobre los espejos M_1 y M_2 . Resultará así posible determinar el valor de dichos radios w_0 , w_1 , w_2 , y las distancias z_1 y z_2 en función de los radios R_1 , R_2 y L . A las 5 ecuaciones resultantes se las denomina las ecuaciones de diseño de la cavidad.

Es posible obtener una ecuación que se denomina la condición de resonancia para cada

modo de oscilación, y que se caracteriza por 3 números denominados genéricamente (l , m , n), de modo que la frecuencia del modo $TEM_{l,m,n}$ estará dada por:

$$v_{l,m,n} = \frac{c}{2L} \left[n + \frac{1}{\pi}(l + m + 1) \sqrt{\left(1 - \frac{L}{R_1}\right)\left(1 - \frac{L}{R_2}\right)} \right]$$

siendo el haz de mejor calidad el correspondiente al modo $TEM_{0,0}$, que resultará común a ambas geometrías.

Propiedades de la emisión láser

Esta radiación posee propiedades muy características: a) la direccionalidad del haz emitido tiene en general una muy baja divergencia sin tratamiento óptico alguno, dependiendo del tipo de láser; b) es posible mediante lentes lograr focalización muy pequeña, con una gran irradiancia en el foco y una alta luminancia (o brillo), que puede llegar, por ejemplo, a valores de 9 a 10 órdenes de magnitud superiores al brillo del Sol, con un pequeño láser de He-Ne. c) la coherencia tanto temporal como espacial suele ser mucho mayor que la de fuentes convencionales.

Control de la emisión láser

La emisión del láser es además pasible de ser modificada y controlada: a) los modos de oscilación tanto longitudinales como transversales pueden ser controlados y lograr emisión en aquellos que sean necesarios utilizar. b) Las líneas de emisión también pueden ser controladas. Si el láser emitiera en varias líneas de emisión simultáneamente, puede ser sintonizado, o sea seleccionar la línea necesaria. El espectro de emisión puede variar en forma continua, o en forma discreta. Existen dispositivos ópticos desarrollados para este tipo de selectividad. También es posible reducir el ancho de la línea de emisión.

Una técnica que permite la emisión de pulsos de gran potencia y breve duración o “pulsos gigantes” es el *Q-switch*, que se logra mediante el control del factor de mérito Q de la cavidad, es decir que las pérdidas de la oscilación sean de tal magnitud que no oscile, pero que siga el proceso de inversión de la población, para luego recuperar el Q durante un breve lapso, y hacer que emita toda la radiación al mismo tiempo. Las técnicas para poder lograrlo son varias: mecánicas, por un reflector rotante, electro o acustoópticas, o bien con un absorbente saturable.

Otra técnica es la emisión de modos sincronizados, o *mode locking*. Los modos longitudinales que oscilan son los que están dentro de la línea de emisión, y lo hacen simultáneamente, produciendo un espectro de frecuencias, siendo las fases relativas entre ellos independientes y no guardando ninguna relación. Pero mediante un control de los modos, es posible lograr que las fases se puedan acoplar entre sí, o sea sincronizarlos, mediante un modulador que funcione a una frecuencia bien determinada, que imponga una relación de fase entre los modos que oscilan, que bien elegida produce un tren de pulsos con un intervalo fijo.

También es posible seleccionar un solo pulso que tendrá una duración muy breve, y se destaca que es posible lograr la estabilización en frecuencias de un láser mediante una técnica denominada *Lamb dip*.

Tipos de láseres

Las ideas teóricas fundamentales del láser fueron publicadas por Schawlow y Townes (1958) en un trascendental artículo. En base a ellas, Teodoro Maiman, el 16 de mayo de 1960 hizo funcionar el primer láser realizado en base a un cristal de rubí sintético, (Al_2O_3)

dopado con iones de Cr^{3+} en forma de barra cilíndrica de 1 cm de diámetro por 2 cm de largo que emitió pulsos en 694,3 nm. (Maiman, 1960). A partir de este instrumento, comenzó una gran actividad no solo para mejorar las performances del nuevo equipo, sino también para lograr láseres en base a otros materiales que cubrieran diferentes regiones del espectro electromagnético, con emisiones pulsadas, continuas y sobre todo controlables. Se inició así una intensa actividad que alcanzó una productividad científica y tecnológica de gran nivel.

Johnson y Nassan (1961) publicaron un artículo en el cual dieron cuenta de la emisión del ion trivalente del neodimio (Nd^{3+}) en CaWO_4 (tungstano de calcio) que emitía en 1,06 m. El mismo ion pero en $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (granate de itrio y aluminio o *Yttrium Aluminium Garnet*, YAG) también emitía en esa misma longitud de onda, de acuerdo a la publicación de Geuser, Marcos y Van Ulter (1964). Es conocido como láser de Nd:YAG y emite también en 1.06 m.

El láser gaseoso de He-Ne fue realizado por Javan, Bennett y Harriot (1961). Tiene unas 5 a 10 partes de He por una de Ne, con una presión total del orden de 1,5 mm de Hg. Emite en 632,8 nm, pero si se le colocan los espejos adecuados puede emitir en 543,5 (verde), 594 nm (amarillo), 612 nm (naranja), o en el infrarrojo en 1,15 m y en 3,39 m. Las potencias típicas en el rojo pueden alcanzar hasta 50 mW.

Patel (1963) inventó el láser de anhídrido carbónico (CO_2), también de tipo gaseoso, logrando emisión en 10,6 μm . Posteriormente su emisión en potencia alcanzó valores muy superiores con el agregado de N_2 y He. Si en lugar de un espejo en un extremo se colocara una red de difracción adecuada, puede llegar a emitir unas 100 líneas que están aproximadamente entre 9 y 11 m. Con diseños adecuados puede llegar a emitir potencias en IR de varios miles de Watts. También puede emitir en forma pulsada con pulsos de potencias muy elevadas.

En particular, los láseres sólidos también han evolucionado de una forma importante. El hecho de disponer de materiales sólidos de alto rendimiento, los ha hecho muy aptos para aplicaciones de larga duración, por ejemplo, en el espacio. Se destacan entre los láseres sólidos, los realizados en base a fibras ópticas y los láseres a disco.

Uno de los láseres más interesantes en la actualidad, es precisamente el láser a disco delgado, LDD, o TDL (*thin disk laser*). Adolf Giesen y sus colaboradores (1994) fueron quienes lo realizaron por primera vez en la Universidad de Stuttgart, Alemania. El material era Yb:YAG, bombeado por otro láser a diodos. Este tipo de bombeo tiene grandes ventajas respecto del tradicional bombeo por lámpara, pues es mucho más eficaz, aumentando la eficiencia de todo el sistema láser.

El medio con ganancia en este tipo de láseres es un cristal con forma de disco delgado, ubicado en reflexión dentro de una cavidad resonante, como si fuera un espejo que es activo. Por ello, también se lo suele llamar “láser a espejo activo”, LEA (*AML, active mirror laser*). El espesor del disco delgado (DD) hace ineficiente la absorción para el bombeo, si se usa un solo paso de dicha radiación. El problema se resuelve mediante el uso de pasos múltiples mediante óptica adecuada. Existen otros materiales que también pueden funcionar de la misma forma. Con este tipo de láseres, se han alcanzado potencias de emisión muy elevadas.

Existen actualmente una gran variedad de tipos de láseres que utilizan diversas técnicas para disponer de formas de emisión que van desde el UV, pasando por el visible y llegando al IR lejano. Varios han llegado a ser comerciales, y con una alta confiabilidad en su funcionamiento. A modo de ejemplo, la NASA ha utilizado láseres habitualmente en sus misiones con diferentes fines. Varias de ellas han utilizado sistemas lidar (acrónimo por *Light Detection and Ranging*) en base a láseres de diferentes tipos para estudiar y carac-

terizar la atmósfera por ejemplo con resultados muy positivos.

Las aplicaciones de los láseres se han diversificado, abarcando temas tales como mediciones, separación de isótopos, sistemas lidar para estudiar la atmósfera y sus propiedades, en la oftalmología, la cirugía, y muchísimas otras cuya enumeración sería muy larga.

Es interesante destacar que hay un tema de gran interés científico, y que se viene desarrollando desde hace ya un tiempo, y es el concerniente a los láseres en la astrofísica, y sus aplicaciones al estudio de las ondas gravitacionales y de la materia oscura.

Emisiones de máseres y láseres

Poco tiempo después de que los láseres comenzaron a ser conocidos y utilizados, se observaron radiaciones similares provenientes de fuentes presentes en el espacio, o sea naturales. En estos casos, ciertamente no es necesaria la presencia de la cavidad resonante que se describió inicialmente.

En efecto, en 1963 se descubrió a través de detallados experimentos de espectroscopia astrofísica, la existencia de emisiones de máseres astrofísicos naturales en el espacio. Fue un evento altamente impactante entre los investigadores astrónomos y astrofísicos. Este tema comenzó cuando Alan Barrett del MIT, USA, y sus colegas, detectaron por primera vez, una señal generada por el radical OH en el espacio, en $\lambda=18,5$ cm. Se logró verificar que había una fuerte emisión en la zona de microondas, correspondiente a ese radical. Inicialmente no se determinó que era emisión máser. Tiempo después, otros estudios confirmaron que, por sus características, era sin dudas una emisión máser en 18,5 cm, de gran intensidad y de ancho de banda muy estrecho, trabajo que llevó a cabo el Prof. Weaver H. y su grupo de la Universidad de California, Berkeley (1965). Cheung, A.C. y sus colegas (1969) descubrieron la emisión máser de la molécula H₂O en $\lambda=1,35$ cm.

Estas radiaciones fueron observadas en el espacio, unos años después de la invención del máser y continuaron apareciendo otras emisiones del mismo tipo, proveniente de más de 100 moléculas, en diferentes lugares del Universo.

La búsqueda de emisión láser natural en el espacio, comenzó a tomar también forma durante la década del 60 por parte de varios científicos. Pero fue recién en 1976 que se logró verificar la emisión no térmica en el infrarrojo de líneas en la zona de 10 μ m, por parte de la molécula de CO₂, en las atmósferas de Marte y de Venus (Johnson *et al.*, 1976). Se pudo confirmar más tarde que era emisión de un láser natural (Mumma, 1981). En 1997 C. Townes descubrió emisiones máser y láser en muchas otras moléculas (Townes, 1997), (Falcke *et al.*, 2000). A estos trabajos iniciales continuaron sumándose más resultados.

También se descubrió en 2002 y en años posteriores emisión láser en la zona de 1 μ m proveniente de los iones Fe⁺ (Johansson *et al.*, 2002, 2003 y 2004). En 2005 también se encontraron emisiones de los átomos de O I en 844,6 nm (Johansson *et al.*, 2005). Otros hallazgos de interés fueron también estudiados por los mismos autores en varias publicaciones adicionales.

El tema es de gran actividad en las investigaciones de la astrofísica mundial. En el Universo hay radiaciones máser y láser de origen natural y que podrían ser en un futuro de gran utilidad, por ejemplo, para comunicaciones interestelares. Algunos de estos investigadores publicaron un texto excelente sobre los láseres astrofísicos (Letokhov y Johansson, 2009).

Observación de ondas gravitacionales con interferómetro láser

En 1916, un año después de la formulación final de las ecuaciones de campo de la relatividad general, A. Einstein predijo la existencia de las ondas gravitacionales. Encontró que las ecuaciones de campo débil linearizadas tenían soluciones ondulatorias: ondas transversales de presión espacial que viajan a la velocidad de la luz, generadas por variaciones temporales de la masa del momento cuadrupolar de la fuente (Einstein, 1916 y 1918). Einstein comprendió que la amplitud de esas ondas gravitacionales podría ser notablemente pequeña. Eddington (1922), publicó también un interesante estudio. Hasta 1957 el debate sobre la realidad física de esas ondas era realmente muy importante.

El descubrimiento del sistema pulsar binario PSR B1913+16 por parte de Hulse, y Taylor, (1975) y las subsecuentes observaciones de sus pérdidas de energía por Taylor y Weisberg, (1982) demostraron la existencia de las ondas gravitacionales.

Lo descubierto, junto con la necesaria comprensión de la astrofísica, condujo al reconocimiento de que las observaciones directas de la amplitud y fase de las ondas gravitacionales podrían conducir a estudios de sistemas relativísticos adicionales y proveer nuevas pruebas de la relatividad general, especialmente en la dinámica del régimen de campos intensos (Press y Thorne, 1972).

Los experimentos para detectar ondas gravitacionales comenzaron con Weber (1972) y sus detectores de masas resonantes en los años 60, seguidos de una red internacional de detectores criogénicos resonantes (Astone *et al.*, 2010).

Los detectores interferométricos fueron sugeridos por primera vez en los años iniciales de las décadas de los 60 por Gertsenshtein y Pustovoi (1962) y de los 70 por Moss, Miller y Forward (1971). En 2015 el llamado LIGO Advanced, llegó a ser el primero de una red de detectores avanzados más sensibles para comenzar las observaciones. (Weiss, 1972), (Drever, 1983, 1989) y (Abramovici *et al.*, 1992).

El 14 de septiembre de 2015 B. P. Abbott y las colaboraciones LIGO (USA) y VIRGO (Italia), y en particular en los dos detectores LIGO instalados en USA, en particular en Hanford, WA y en Livingston, LA, encontraron por primera vez las ondas gravitacionales (Abbott *et al.*, 2016).

Con el detector VIRGO en Italia se observó el fenómeno, pero no fue posible medir por problemas técnicos. Pero si con ambos detectores LIGO se pudo localizar la fuente GW 250914 punto en que fue la coalescencia o fusión de dos agujeros negros que al fundirse en uno solo, pudieron haber generado las ondas detectadas (Brillet *et al.*, 1989), (Abbott *et al.*, 2016).

Ambos detectores LIGO, operaban cada uno con un interferómetro de Michelson modificado con dos brazos de 4 km cada uno. El paso de la onda gravitacional alteraba la longitud de los brazos y la diferencia entre los mismos es proporcional a la amplitud de la presión de la onda gravitacional, que se expande sobre el detector o sea el interferómetro (Hough *et al.*, 1989).

El interferómetro fue modificado para tener una buena sensibilidad con mejoras sustantivas en todo el sistema. El láser utilizado fue un Nd:YAG súper estabilizado en frecuencias, amplitud y geometría del haz. El ruido fue reducido a su mínima expresión. Todo el sistema estaba aislado de las vibraciones del piso y de todo otro generador de ruido, y entre otras precauciones se colocaron aisladores de vibraciones en ultra alto vacío. Es decir, se evitó todo tipo de señales espúreas que pudieran venir de otras fuentes que no fueran del lugar ubicado en el espacio (Aasi *et al.*, 2015), (Acernese *et al.*, 2015) y (Affeldt *et al.*, 2014).

Los detectores LIGO observaron y midieron así las ondas gravitacionales de la fusión de las dos masas estelares de los dos agujeros negros. Las formas de las ondas detectadas concuerdan con las predicciones de la teoría de la relatividad general para dicha fusión del par de agujeros negros y del simple agujero negro resultante.

Usando los ajustes con las simulaciones numéricas de los modelos que predicen de ambos agujeros negros fusionados, se pudo estimar la masa y el spin del agujero negro final, la energía total radiada en las ondas gravitacionales y el pico de luminosidad de esa onda gravitacional.

La materia oscura y el láser

Con la información suministrada por los astrofísicos, y en particular aplicando las leyes de Newton de la gravitación universal, se pudo comprobar que cuando se observan los movimientos de las galaxias, sus velocidades, dimensiones y formas, se encuentra que dichas leyes no se cumplirían, si no se aceptara que hay más materia que la que se conoce y observa (Bertone y Hooper, 2018). Hacia 1933 un astrónomo suizo, Fritz Zwicky, fue el primero en proponer su existencia, y la denominó la “materia oscura”. Esa materia ha recibido el nombre de “oscura” dado que no es visible, pues no interacciona con la luz, o sea no es ni absorbida ni reflejada (Zwicky, 1937).

Existen varias formas de demostrar la existencia de la Materia Oscura. Una es por el movimiento de los cuerpos celestes que son afectados por su presencia. En efecto, es sabido por las leyes de Newton que, en nuestro sistema solar, los planetas más alejados del Sol se mueven a velocidades más lentas que los que están más próximos al Sol. Más lejos están, a menor velocidad se mueven. Con las galaxias y su centro debería suceder lo mismo. Por el brillo se supone que el centro de la galaxia tiene más masa que sus zonas alejadas, que tienen menor brillo. Entonces, siguiendo un razonamiento similar al sistema planetario, los objetos que orbitan más lejos deberían ir a menor velocidad que los más próximos al centro. Se debe recordar que la forma de medir la velocidad de los cuerpos que emiten luz, es por el efecto Doppler. Es decir, tomar una línea del espectro de la luz emitida por una estrella, y medir el corrimiento hacia el rojo de dicha línea o sea determinar la variación de la frecuencia de la luz emitida, que resultará proporcional a la velocidad del emisor. Cooper y Ford (1970) midieron las velocidades de las estrellas de una galaxia, a diferentes distancias desde el centro de la misma. Y observaron que las velocidades no variaban demasiado, como si fueran las velocidades de un disco sólido a diferentes radios. Eso querría decir que hay más masa concentrada a las diferentes distancias del centro de la galaxia.

La materia oscura tendría propiedades que aún no ha sido posible conocer, y que permanecen ignoradas por la ciencia hasta la actualidad. Obviamente se han generado muchas ideas y publicaciones que tratan de explicarla, pero hasta ahora no se ha encontrado nada en forma experimental. Ocupa un alto porcentaje del universo (Ibarra, 2015), (Clowe, *et al.*, 2006).

Otra posibilidad de verificación de la existencia de la MO es utilizando la curvatura de los rayos de luz que pasan cerca de una masa importante, efecto conocido como lente gravitacional. Este fenómeno predicho por Einstein fue observado experimentalmente por primera vez por Sir Arthur Eddington en 1919. En efecto, primero midió la separación de los rayos de luz provenientes de estrellas al pasar cerca del Sol. A los seis meses midió las mismas distancias entre sí de los mismos rayos, pero sin pasar al lado del Sol, o sea dejándolo detrás del observador, marcándose así una diferencia notable (Wambsganss, 1998). Sin duda la presencia del Sol fue responsable de la diferencia de distancias.

En el cúmulo Bala, que sería el resultado de una gigantesca colisión entre dos galaxias quedaron separadas las zonas de materia oscura de las zonas de materia normal. Las lentes gravitacionales observadas en fotografías permiten detectar la presencia de esa

materia oscura que es la que provoca dichas lentes, o sea un desvío importante de las radiaciones provenientes de las galaxias. También un extraño anillo de material oscura rodea al cúmulo ZwCL0024+1652, constituyendo una evidencia muy importante actualmente para la existencia de la materia oscura. Existe así mismo la idea de que dicho anillo fue producido por una colisión entre dos cúmulos gigantescos.

Dentro de las teorías que tratan de explicar la materia oscura, se supone que estaría compuesta por axiones, que son partículas que existirían, o sea hipotéticas, y que podrían ser una de las componentes de esa materia oscura. No han sido observadas aún en forma directa. También formarían parte de esa materia oscura otras partículas, las WIMP por su acrónimo en inglés “*Weakly Interacting Massive Particles*” que se habrían producido en el Universo inicial.

El grupo del Dto. de Física de la Universidad de Tokyo, dirigido por el Prof. Y. Michimura, ha propuesto una experiencia para detectar los axiones basada en la utilización del LIGO, o sea el *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* instalado en USA, con pequeñas modificaciones (Nagano et al., 2019). Cabe recordar que con este instrumento en 2016 se detectaron por primera vez, dichas ondas gravitacionales (Kwee et al., 2012) y (Abbott et al., 2016). La idea de los modelos actualmente utilizados, muestran que los axiones afectarían la polarización de la luz. Y el refuerzo de las oscilaciones en el interferómetro de Fabry-Perot aumentaría las posibilidades de su detección.

Referencias

- AASI, J. et al., (2015). *Classical Quantum Gravity* 32, 074001
- ASO, Y.; MICHIMURA, Y.; SOMIYA, K.; ANDO, M.; MIYAKAWA, O.; SEKIGUCHI, T.; TATSUMI, D. y YAMAMOTO, H., (2013). Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector. *Phys. Rev. D* 88,043007.
- ABBOTT, B. P. et al., (2016). (Ligo Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger..*Phys. Rev. D* DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102.
- ABRAMOVICI, A. et al., (1992). LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory. *Science* 256,325.
- ACERNESE, F. et al., (2015). *Classical Quantum Gravity* 32,024001
- AFFELDT, C. et al., (2014). *Classical Quantum Gravity* 31,224002
- ASTONE, P. et al., (2010). IGEC2: A 17-month search for gravitational wave bursts in 2005–2007 *Phys. Rev. D* 82, 022003
- BERTONE, G. y HOOPER, D. History of dark matter. *Rev. M. Phys.* 90:0450002. (2018). DOI: 10.1103/revmodphys.90.045002.
- BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine* Part I. 26: (151) 1-25. (1913) DOI:10.1080/14786441308634955
- Part II. 26: (153) 476-502. (1913) DOI:10.1080/14786441308634993
- Part III. 26: (155) 857-875. (1913) DOI: 10.1080/14786441308635031
- BRILLET, A.; GIAZOTTO, A. et al. Virgo Project Technical Report No. VIR-0517A-15, (1989), <https://tds.ego-gw.it/ql/?c=11247>.
- CHEUNG, A. C.; RANK, D. M.; TOWNES, C. H.; THORNTON, O. D. y WELCH, W. I., (1969). Detection of water in interstellar regions by its microwave radiation. *Nature* 221, 626–628.
- CLOWE, D.; BRADAC, M.; GONZÁLEZ, A.; MARKEVITCH, M.; RANDALL, S.; JONES, C. y ZARITSKY, D. A., (2006). Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal*. 648,L109DOI<https://doi.org/10.1086/508162>
- DREVER, R.W.P., (1983). *Gravitational Radiation*. Edited by N.Deruelle and T. Piran North-Holland, Amsterdam, p. 321.
- DREVER, R.W.P.; RAAB, F. J.; THORNE, K. S.; VOGT, R. y WEISS, R., (1989). *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory(LIGO) Technical Report*, <https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public/main>.

- EINSTEIN, A., (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Ann Physik* 17,132.
- EINSTEIN, A., (1916). Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* 1,688.
- EINSTEIN, A., (1917). On the quantum theory of radiation. *Z. Phys.* 18,121,
- EINSTEIN, A., (1918). Über Gravitationswellen. *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.* 1,154.
- EDDINGTON, A. S., (1922). The propagation of gravitational waves. *Proc. Roy. Soc. Lond. A.*,102. 68-282. DOI: 10.1098/rspa.1922.0085.
- FABRIKANT, V. A., (1940). *Tr. Vses. Elektrotekhn. Inst.* 41, 254.
- FALCKE, H.; HENKEL, C.; PECK, A. B.; HAGIWARA, Y.; ALMUDENA PRIETO, M. y GALLIMORE, J. F., (2000) Discovery of a very luminous megamaser during a radio flare in the Seyfert 2 galaxy Mrk 348. *Astronomy & Astrophysics Letters*. arXiv:astro-ph/0004368v1 27 Apr 2000.
- GAVIOLA, E., (1928). An experimental test of Schrödinger's Theory. *Nature*. Nov. 17.
- GAVIOLA, E., (1928). The power relation of the intensities of the lines in the optical excitation of mercury. *Theory I. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science.* 7,1154-1167.
- GERTSENSHTEIN, M. E. y PUSTOVOIT, V. I., (1962). A Laser Interference System for Detecting Gravitational Waves. *Sov. Phys. JETP* 16,433.
- GEUSIC, J. E.; HENSEL M. L. y SMITH, R.G., (1965). A Repetitively Q-Switched Continuously Pumped YAG:Nd Laser. *Appl. Phys. Lett.* 6,9,175-177.
- GIESEN, A.; HIIGEP, H.; VOSS, A.; WITTIG, K.; BRAUCH, U. y OPOWER H., (1994). Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers. *Appl. Phys. B* 58,363 doi.org/10.1007/BF01081875.
- GIESEN, A. y SPEISER, J., (2007). Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws. *J. Sel. Top. Quantum Electron.* 13,(3),598, doi.org/10.1109/JSTQE.2007.897180.
- GORDON, J.P.; ZEIGER, H. Z. y TOWNES, C. H., (1954). Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH₃. *Phys. Rev.* 95, 282.
- HERTZ, H., (1887). Ueber Einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. *Ann Physik.* 3,31,983-1000.
- HOUGH, J. et al., (1989) Proposal for a joint German-British interferometric gravitational wave detector, MPQ Technical Report 147, No.GWD/137/JH(89), <http://eprints.gla.ac.uk/114852>.
- HULSE, R.A. y TAYLOR, J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J.* 195, L51, (1975).
- IBARRA, A., (2015). DARK MATTER Theory. *Science Direct. Nuclear and Particle Physics Proceedings* 267-269, 323 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.10.126.
- JAVAN, A.; BENNETT W.R. y HERRIOT D.R., (1961). Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. *Phys. Rev. Lett.*, 6,3,106-110.
- JOHANSSON, S. AND LETOKHOV, V. S., (2002). Laser action in a gas condensation in the vicinity of a hot star. *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics* 75,591-594.
- JOHANSSON, S. y LETOKHOV, V., (2003). Radiative cycle with the stimulated emission from atoms and ions in an astrophysical plasma. *Physical Review Letters* 90(1), 011101-4.
- JOHANSSON, S. y LETOKHOV, V. S., (2004). Astrophysical lasers operating in optical Fe II lines in stellar ejecta of Eta Carinae. *Astronomy and Astrophysics* 428,497-509.
- JOHANSSON, S. y LETOKHOV, V. S., (2005). Astrophysical laser operating in the OI 844,6 nm line in the Weigelt bobs of η Carinae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Journal* 364, 731-737.
- JOHNSON, L.F. y NASSAU, K., (1961). Infrared Fluorescence and Stimulated Emission of Nd³⁺ in CaWO₄. *Proc. IRE* 49, 11, 1704-1706.
- JOHNSON, M. A.; BETZ, A. L.; MCLAREN, R. A.; SUTRON, E. C. y TOWNES, C. H., (1976).

- Nonthermal 10 micron CO₂ emission lines in the atmospheres of Mars and Venus. *Astrophysical Journal* 208, L145–L148.
- KWEE, P.; BOGAN, C.; DANZMANN, K.; FREDE, M.; KIM, H.; KING, P.; PÖLD, J.; PUNCKEN, O.; SAVAGE, R. L.; SEIFERT, F.; WESSELS, P.; WINKELMANN, L. y WILLKE, B., (2012). Stabilized high-power laser system for the gravitational wave detector advanced LIGO. Vol. 20,10,10617-10634 .DOI: 10.1364/OE.20.010617.
- LETOKHOV, V. y JOHANSSON, S., (2009). *Astrophysical Lasers*. Oxford University Press.
- MAIMAN, T., (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*. 187, 4736, 493–494.
- MOSS, G. E.; MILLER, L. R. y FORWARD, R. L., (1971). LIGO Experiments Cannot Detect Gravitational Waves by Using Laser Michelson Interferometers—Light’s Wavelength and Speed Change Simultaneously When Gravitational Waves Exist Which Make the Detections of Gravitational Waves Impossible for LIGO Experiments. *Appl. Opt.* 10,2495. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.10.002495>.
- MUMMA, M. J.; BUHL, D.; CHIN, G.; DEMING, D.; ESPENAK, F.; KOSTIUK, T. y ZIPOY, D., (1981). Discovery of natural gain amplification in the 10-micrometer carbon dioxide laser bands on Mars: a natural laser. *Science* 212, 45–49.
- NAGANO, K.; FUJITA, T.; MICHIMURA, Y. y OBATA, I., (2019). Axion Dark Matter Search with Interferometric Gravitational Wave Detectors. *Physical Review Letters*, 123, 111301 DOI: 10.1103/Phys.Rev.Lett.123.111301.
- PATEL, C.K.N., (1964). Interpretation of CO₂ Optical Maser Experiments. *Phys. Rev. Lett.* 12,21,588-590.
- PLANCK, M., (1900). Ueber irreversible Strahlungsvorgänge. *Ann. Physik* 4,1,69.
- PRESS, W. y THORNE, K., (1972). Gravitational-Wave Astronomy. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 10,335.
- QUEL, E. y ROSITO, C., (1995). *Introducción al láser. Física y Tecnología*. Editorial Lugar Científico. Buenos Aires.
- RUBIN, V. COOPER y FORD, K., (1970). Rotation of the Andromeda Nebula from a spectroscopic survey of emission region. *The Astrophysical Journal*, 159,379, DOI:10.1086/150317.
- SCHAWLOW, A. L. y TOWNES, C. H., (1958). Infrared and Optical Masers. *Phys. Rev.* 112,1940.
- TAYLOR, J. H. y WEISBERG, J. M., (1982). A New Test of General Relativity: Gravitational Radiation and the Binary Pulsar PSR 1913+16. *Astrophys. J.* 253, 908.
- TOWNES, C. H., (1997). Space maser and lasers. *Kvantovaya Elektronika (Russian)* 27, 1063–1066.
- WEAVER, H.; WILLIAMS, D. R. W.; DIETER, N. H.; HANNILON, H. y LUM, W. E., (1965). Observations of a strong unidentified microwave line and of emission from the OH molecule. *Nature* 208,29–30.
- WAMBSGANSS, J. Gravitational Lensing in Astronomy. *Living Rev. Relativity*, 1, 12, (1998). DOI 10.1007/lrr-1998-12.
- WEBER, J., (1960). Detection and Generation of Gravitational Waves. *Phys. Rev.* 117,306.
- WEISS, R., (1972). Electromagnetically coupled broadband gravitational antenna, Quarterly Report of the Research Laboratory for Electronics, MIT Report No. 105, <https://dcc.ligo.org/LIGO-P720002/public/main>.
- ZWICKY, F., (1937). On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *The Astrophysical Journal*, 86, 217. DOI: 10.1086/143864.