

# Abordaje de la enseñanza de aspectos importantes de la física moderna a través del uso de un láser de xenon multi-ionico pulsado

(Important aspects of modern physics teaching approach through the use of a multi-ionic xenon laser)

M. Gallardo<sup>1</sup>, A.P. Laquidara y J. Reyna Almandos

*Centro de Investigaciones Opticas, La Plata, Argentina*

Recebido em 12/4/2007; Aceito em 28/8/2007

Este trabajo tiene por finalidad presentar un láser de Xe multi-iónico pulsado, a partir del cual se pueden realizar demostraciones, prácticas de laboratorio o iniciar trabajos de investigación en temas de física moderna, espectroscopía atómica y láseres gaseosos, así como para ser utilizado en la enseñanza de grado y postgrado. Además, el empleo de todo el instrumental que compone el equipo, permite tomar contacto con fuentes de alta tensión, equipos de vacío, de óptica y con el uso de detectores y analizadores de radiación luminosa, instrumental que generalmente no se utiliza dentro de los esquemas de la enseñanza tradicional.

**Palabras clave:** física moderna, enseñanza, láser.

This work intends to present a pulsed multi-ionic Xe laser to perform demonstrations, lab experiments or begin research works in topics of modern physics, atomic spectroscopy and gaseous lasers. It can be used also in the graduate and post-graduate teaching. In addition, the use of all the instruments that compose the equipment allows to make contact with high voltage power supplies, high vacuum technique, optical assemblies and the use of light detectors and radiation analyzers, which are instruments that generally are not used within the traditional teaching.

**Keywords:** modern physics, teaching, laser.

## 1. Introducción

Las currículas que rigen las carreras de grado en física e ingeniería, incluyen temas y experiencias de óptica y física moderna, que no alcanzan a cubrir con amplitud conceptos que resultan fundamentales cuando el alumno está alcanzando el final de sus estudios, por lo que carece de los conocimientos experimentales suficientes para iniciar su etapa de investigación o de aplicación tecnológica de lo aprendido en la misma.

Un alumno avanzado de grado o en general un asistente a un curso de post-grado, no ha participado activamente en prácticas de laboratorio o demostraciones en donde se utilizaban redes de difracción, bombas y detectores de vacío, analizadores de radiación luminosa, fuentes de alimentación, etc. y en mucha menor medida, tomado contacto directo con un láser de enseñanza.

Con seguridad, su interacción con un emisor de radiación estimulada - LASER - se realizó con un equipo comercial con el que sólo puede obtenerse un dado color y una determinada potencia, sin posibilidad alguna de cambio u observación de su constitución interior.

Los láseres han tenido un gran impacto en las más importantes ramas de la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas, por lo que saber cómo están constituidos, su funcionamiento y las características de su tan particular emisión, deberían formar parte del conocimiento de un profesional en estas áreas.

El objetivo de este trabajo es describir un dispositivo láser experimental, en este caso gaseoso, en sus orígenes concebido para investigación científica, que permita transferir dentro de la enseñanza universitaria, conocimientos más profundos en diversos temas de la ciencia y la tecnología.

Desde hace muchos años, alumnos de ingeniería y ciencias, de Universidades Argentinas, así como participantes Latinoamericanos en cursos de post-grado, han asistido en nuestro Centro a clases de demostración y en algunos casos, realizado trabajos con el equipo láser y la experiencia acumulada ha permitido planear mejoras al mismo y ampliar la serie de temas en los que se puede proyectar su intervención. Además, es necesario resaltar, que tal experiencia ha posibilitado la transferencia no sólo de conocimientos básicos a través de pasantías, sino también de equipamiento de laboratorio

<sup>1</sup>E-mail: gallardom@ciop.unlp.edu.ar.

construyendo para su instalación partes o un todo de nuestro desarrollo experimental.

Toda la infraestructura empleada para operar un láser de Xe multi-iónico pulsado UV-VIS-IR (ultravioleta - visible - infrarrojo), permite también visualizar adecuadamente la teoría de la emisión espontánea, la introducción a la emisión estimulada y las condiciones a cumplir para que, de las muchas transiciones (líneas espectrales) que se observan al analizar el espectro luminoso generado al excitar un material determinado, sólo algunas de ellas puedan comportarse como láser.

## 2. Equipo experimental

Para marcar el inicio de la descripción detallada respecto de la infraestructura experimental que será base de este trabajo, la Fig. 1 muestra el esquema elemental de un láser, que formalmente, debe estar constituido por una fuente de excitación, un medio activo y una cavidad resonante.

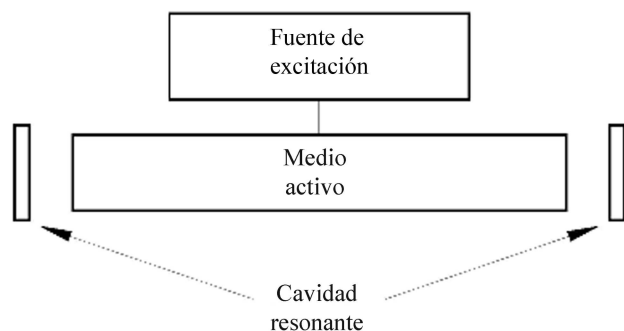


Figura 1 - Esquema básico de un láser.

En nuestro caso, dicho esquema se compone de una fuente pulsada que excita el medio activo gaseoso de Xe, confinado en un tubo a baja presión. Por último, la cavidad resonante, formada por dos semi-espejos cóncavos, concentra axialmente dentro de ella, la radiación luminosa emitida y es la responsable finalmente de seleccionar las transiciones que amplificará y generará como láser el sistema.

La Fig. 2 muestra más en detalle el diagrama completo del equipo experimental básico.

El sistema de descarga, se basa en un capacitor de baja inductancia (20-200 nFar), cargado entre 5 y 15 kV, dispuesto para generar por medio de una llave rápida (spark - gap) pulsos de 1 a 3 kAmp a través del gas confinado en el tubo. La llave de disparo, constituye un eslabón importante entre la energía acumulada en el capacitor y el tubo de descarga. La versión más elemental incorpora una bujía de automóvil modificada conectada a tierra (-), gatillada por un generador de pulsos (1-200 Hz) en el electrodo principal. La llave se completa con un segundo electrodo conectado a la alta tensión.

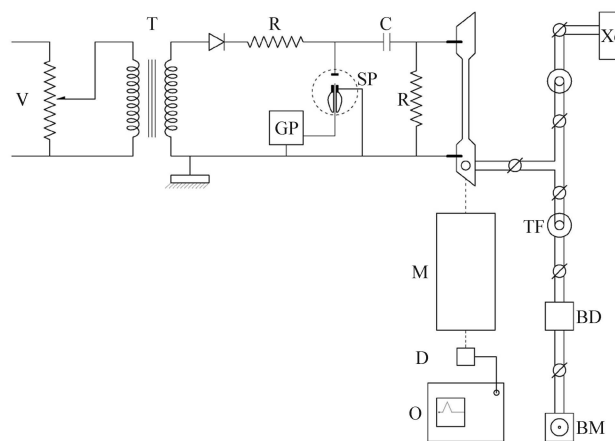


Figura 2 - Diagrama del equipo experimental: (V) Variac, (T) Transformador, (R) Resistencia, (C) Capacitor, (SP) Spark-Gap, (GP) Generador de Pulsos, (TF) Trampa Fría, (BD) Difusora de Vacío, (BM) Bomba Mecánica, (M) Monocromador, (D) Detector, (O) Osciloscopio.

Lo simple y no costoso del desarrollo de este tipo de llave, conspira en alguna medida con la repetibilidad del pulso generado, aunque por mucho tiempo el dispositivo cumplió aceptablemente con las exigencias requeridas.

El sistema de vacío en su versión más elemental, constituido por una bomba mecánica y una difusora de aceite, debe garantizar presiones del orden de  $10^{-5}$  Torr para permitir, fundamentalmente, la operación de limpieza del tubo de descarga y la estructura adicional.

Como la operación del láser requiere que el Xe sea lo más puro posible, la garantía primaria es el correcto desempeño del sistema de bombeo, contar con una estructura adicional confiable para el tránsito del gas dentro del equipo y finalmente poseer Xe con la menor cantidad de impurezas posible.

El alto costo de una carga de Xe puro, que permite trabajar un largo tiempo, puede reducirse adquiriendo gas de menor calidad procesándolo en trampas frías. El Xe solidifica a temperaturas de aire líquido, pero no las impurezas más comunes (O, N, C, etc.). Del reservorio primario adquirido, se traslada una pequeña porción al sistema trampa, se enfría y luego de algunos minutos se la conecta al sistema de vacío un corto tiempo para poder eliminar las impurezas. Esta operación limpia el Xe confinado en la trampa, que una vez quitado el aire líquido, se transforma en el reservorio de trabajo.

El diagrama se completa con un esquema simple del equipamiento primario destinado al análisis de la radiación generada por la descarga, el que será descrito más adelante.

La Fig. 3, muestra un esquema más detallado del tubo de descarga, que aparece conectado al sistema eléctrico en la figura anterior.

La parte principal de la fuente luminosa, consiste en un tubo de Pirex de aproximadamente 1.3 m de longitud y entre 4 y 6 mm de diámetro interno, con electrodos fríos de tungsteno, dispuestos lateralmente. El

tubo termina en ventanas de vidrio óptico o cuarzo, orientadas en el ángulo de Brewster y está recubierto de una camisa de vidrio que lo refuerza estructuralmente y que permite la circulación de agua para su refrigeración. Dicho tubo está conectado a una línea de vacío que permite la limpieza del mismo y posteriormente contribuye al llenado con gas Xe, a una presión contro-

lable que varía entre 1 y 100 mTorr. medida a través de un vacuómetro convencional. Como se muestra en la figura, una camisa metálica conectada al electrodo de tierra provee un retorno coaxil de la corriente generada por el sistema de descarga, reduciendo la inductancia del circuito.

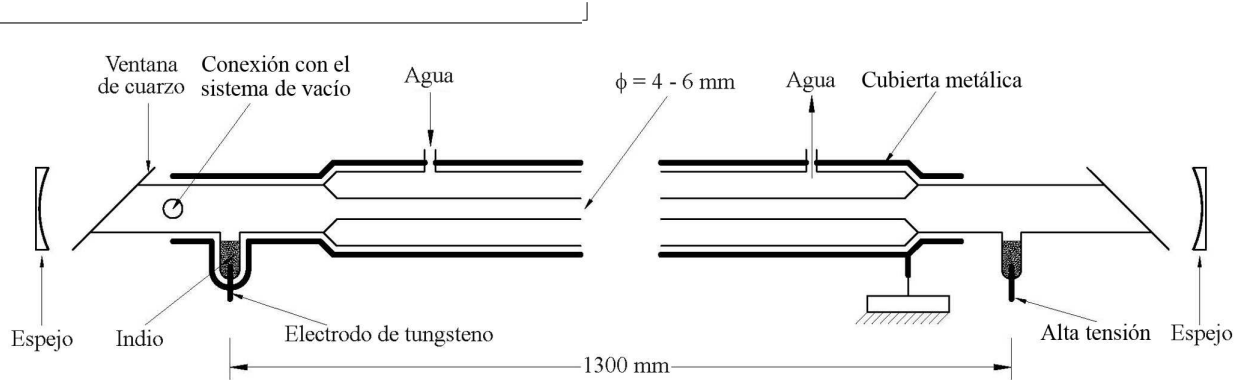


Figura 3 - Tubo de descarga y cavidad resonante.

La cavidad resonante, está compuesta por dos semi-espejos cóncavos enfrentados, de 1.5 m de distancia focal, colocados tal que formen una "cavidad confocal" (separados a una distancia igual a la focal y con sus ejes coincidentes). Los recubrimientos de los espejos, pueden ser de oro o material dieléctrico con reflectividades variables de acuerdo a la región del espectro en que se trabaje. Los espejos deben estar montados en bases especiales con movimientos controlables para su alineación.

### 3. Modificaciones al sistema original y equipamiento adicional

Los detalles del equipo experimental descrito hasta aquí, determinan una base primaria del desarrollo de un láser de Xe pulsado. Durante los años de trabajo diversas partes del mismo sufrieron modificaciones tendientes a mejorar la emisión y en algunos casos a rescatar de la estructura original información que permita un mejor entendimiento de la física del láser.

El primer cambio que se introdujo en el sistema, consistió en modificar los viejos electrodos de tungsteno, recubriéndolos con Indio (fig 3). El Indio tiene la propiedad de absorber impurezas y este hecho determinó un incremento sustancial en la salida del láser. Pero al trabajar con alta frecuencia, los electrodos se calientan, por lo que la última versión, elimina al tungsteno quedando sólo un cilindro de Indio de 4 mm de diámetro como conector del tubo de descarga.

El clásico sistema de bombeo, mecánica-difusora, puede en ciertos casos introducir impurezas que se generan por el aceite usado en el circuito de tránsito del

gas. Esto se elimina con una trampa fría similar a la usada para almacenar Xe. En la actualidad pequeñas bombas turbomoleculares pueden suplantar con éxito al antiguo sistema aportando además mejoras en el vacío final alcanzable.

También el spark-gap fue modificado con el tiempo. La segunda versión, que deja atrás el uso de la bujía de automóvil, está constituida por un sistema comercial de presión controlada en el cual los electrodos encerrados son gatillados por el generador de pulsos usado en el anterior sistema. La última etapa, que no desecha todo lo anterior aunque lo reemplaza, incorpora al sistema de descarga una llave de alta velocidad - tiratrón de Hidrógeno - , que acoplada en forma coaxial con un capacitor de 100 nF, ha constituido el mejor sistema de disparo, generando pulsos de alta frecuencia y con un alto grado de repetibilidad.

Teniendo ahora al láser de Xe operando, previa etapa de alineación que será descrita más adelante, se debe contar con un equipamiento adicional que permita, más allá de la mera observación de la emisión visible, no sólo captar la radiación UV e IR, sino también determinar las longitudes de onda, realizar variaciones de presión y corriente registrando los cambios en la emisión y por último, si la disponibilidad de equipamiento lo permite, parametrizar la descarga y realizar espectroscopía resuelta en tiempo.

El detalle siguiente, muestra una lista de instrumental que puede ser usado, dentro de posibles limitaciones, con el fin de rescatar del equipo del láser la mayor información posible, ya que ella permitirá dar sustento a los conocimientos teóricos que se pondrán en juego en el momento del análisis final, - teórico-práctico - ,

relativo a la física del láser. La lista mencionada es la siguiente:

**a) Sistemas dispersivos para observar las distintas transiciones láser**

- Red de difracción preferentemente plana que permita separar las distintas transiciones; observar las visibles (400-700 nm) o permitir detectar electrónicamente las que no lo son.
- Pequeño monocromador tipo Czerny - Turner o similar que permita determinar la longitud de onda de las transiciones. En caso contrario, el uso de la red de difracción y óptica simple adicional, alcanzarían para tal tarea pero con menor precisión. En ambos casos sería conveniente contar con detección electrónica simple.

**b) Detección electrónica**

- Un simple detector de sulfuro de plomo (PbS), cubre el rango de observación desde el UV cercano al IR (300-2700 nm). Un osciloscopio elemental permite observar la señal pulsada proveniente del detector.

Cuando se quiere trabajar en observaciones resueltas en el tiempo, es necesario contar con detectores y osciloscopios de respuesta rápida, ya que el ancho del pulso láser es del orden de los sub-microsegundos.

**c) Espira de Rogowski**

- Si se tiene un osciloscopio como el requerido en el punto anterior y además se cuenta contar con una Espira de Rogowski o se la puede fabricar y calibrar, se podrá medir la corriente que atraviesa el tubo de descarga y observar la forma temporal de la misma.

#### 4. Tareas de enseñanza en el laboratorio

Las operaciones iniciales tendientes a preparar al sistema para lograr la emisión láser, integran el primer paso de la aplicación del equipo para la enseñanza.

Al obtener las condiciones ideales de vacío, cargar el sistema con el gas y preparar y disparar la fuente de alta tensión para iniciar la fase previa, ya comienza la tarea de adquirir nuevos conocimientos ya que nos encontramos con una fuente luminosa, cuya emisión ha sido y sigue siendo estudiada por el Grupo de Espectroscopía Atómica del CIOp. Los resultados alcanzados se describen en una recopilación realizada por el National Institute of Standards and Technology [1].

Estos estudios indican que la emisión espontánea proveniente del tubo de descarga contiene una mezcla de Xe neutro y iones del gas entre una y ocho veces

ionizado. Sólo en la región visible, la que puede ser observada por medio de un espectroscopio convencional, yacen alrededor de 4000 transiciones (o líneas espectrales) que se reparten entre las componentes del plasma generado por la descarga. En nuestro caso, describimos al "plasma" como un gas confinado de alta temperatura, caracterizado por una elevada ionización de sus partículas.

Incorporar al conocimiento inicial del tema todo lo visto hasta este momento, constituye un amplio primer paso de nuevas ideas teóricas y prácticas.

El segundo paso comienza alineando la cavidad resonante mediante el empleo de un pequeño láser comercial auxiliar y el uso de los movimientos controlados de los espejos. El haz láser debe atravesar longitudinalmente el tubo de descarga y esa línea de referencia debe servir para posicionar correctamente enfrentados a los espejos. Seguidamente y ya iniciada la descarga a una presión alta, se comienza a evacuar el gas confinado en el tubo hasta alcanzar la presión exacta para el comienzo de la emisión láser.

Colocando una simple red de difracción frente a la salida del láser, la primera visión será sin duda de dos o tres transiciones en la región azul-verde del espectro. Si continuamos descendiendo la presión, pueden aparecer una o dos más y luego del total, desaparecer también dos o tres. Esta descripción del comportamiento de la salida inicial del láser de Xe, inicia el proceso de explicar cómo funciona un láser y el porqué de lo observado en este primer contacto con él.

Conocidos los procesos de emisión espontánea y estimulada, el LASER como la sigla lo sintetiza, es un amplificador de luz por medio de dicho proceso de emisión estimulada.

La cavidad resonante, contribuye a lograr que el grado de amplificación que se obtenga supere las pérdidas del sistema, por medio del proceso de reflexiones múltiples en ella.

Al alcanzar ese cometido la radiación láser emerge a través de al menos uno de sus espejos con gran intensidad, en la dirección del eje del tubo de descarga, linealmente polarizada por la acción de las ventanas colocadas según el ángulo de Brewster y cada una de las transiciones de un color definido (monocromática).

Falta de todas maneras responder al hecho que, cuando observamos la emisión espontánea inicial a través del espectroscopio, tenemos centenares de transiciones dentro de ese rango visible y ahora sólo unas pocas transiciones láser. Por lo tanto en este punto es necesario aclarar que para que se trate de una emisión láser se deben satisfacer otras condiciones.

Fundamentalmente, una transición definida involucra dos niveles de energía del átomo o ion en cuestión. En emisión, la transición se produce cuando el electrón pasa del nivel superior de mayor energía al inferior de menor energía, emitiendo un fotón. Dicho fotón puede actuar sobre otro par de niveles similares de otro átomo

o ion y forzar al mismo a emitir. Esto es emisión estimulada y el inicio del proceso de amplificación, ya que ahora se cuenta con dos fotones que se mueven en la misma dirección y en fase. Este proceso debería continuar con muchos otros pares de niveles, pero deben cumplirse ciertas condiciones para que finalmente el mismo tenga posibilidades de alcanzar el éxito de generar emisión láser.

La condición primaria que involucra todos los pares de niveles similares a los dos primeros que contiene el material excitado, dice que debe haber más pares con el electrón en el nivel superior que en el inferior, lo que significa que la población de niveles superiores debe ser mayor que la población de inferiores. Esta inversión de población se obtiene en muy pocos pares de niveles de un átomo ó ion, ya que viola el postulado de Boltzmann, pero logra producirse en un estado no estacionario del sistema, llamado en los inicios del láser como de “temperatura negativa”.

Estudios espectroscópicos resueltos en tiempo, permiten estimar los tiempos de vida de los niveles de energía y para que la inversión de población sea posible, la vida media del nivel superior debería ser más grande que la del inferior, así este último se despoblaría más rápidamente que el superior. Crear las condiciones experimentales para que el sistema opere como un generador de emisión estimulada, es parte fundamental del trabajo del investigador y marca el inicio de la posibilidad de transferencia de los conocimientos acumulados.

Con el hecho concreto de tener emisión láser y con los conocimientos básicos elementales para caracterizarlo, el siguiente paso es calcular la longitud de onda de las transiciones visibles observadas. Esta operación puede realizarse de manera sencilla con la ayuda de una red de difracción o con un pequeño monocromador.

Seguramente las líneas observadas en el inicio del proceso estarán dentro de la siguiente lista: 495,4 nm, 526,0 nm, 535,2 nm y 539,4 nm.

Al observar la tabla completa de transiciones del Xe, éstas se adjudican al ion cuatro veces ionizado (Xe V), es decir el átomo de Xe al que se le han quitado cuatro electrones.

Para corroborar lo expresado respecto de la importancia de las vidas medias de los niveles involucrados en la transición láser, cálculos teóricos realizados en Xe V [2] y particularmente en la línea 495.4 nm, muestran que el tiempo de vida del nivel superior es 38.3 ns y el correspondiente al inferior, 0.04 ns.

La Fig. 4 muestra la escena típica de un desarrollo temporal - pulso de corriente-emisión espontánea-emisión estimulada -, obtenida mediante el uso de una espira de Rogowski, un detector rápido y un osciloscopio con la capacidad de captar eventos generados en tiempos cortos. Dentro de un pulso de corriente de 2  $\mu$ s de ancho, aparece primero el pulso correspondiente a la emisión espontánea y luego, más angosto temporalmente, el pulso láser con ancho de 200 ns.

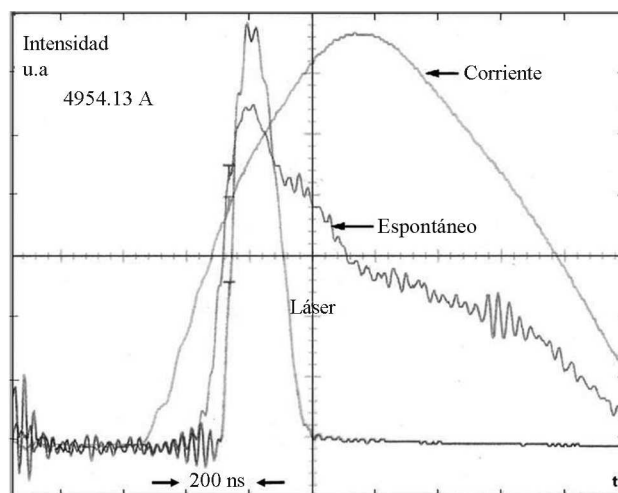


Figura 4 - Evolución temporal de la línea 4954.13 Å (Xe V) en sus emisiones espontánea y láser y el correspondiente pulso de corriente. La escala horizontal, representa la variación del tiempo con 100 ns por división.

Con las líneas láser visibles operando, cuando comenzamos a disminuir la presión, generalmente ocurren dos hechos: permanecen ante nuestra vista las transiciones 495.4 y 535.2 nm y aparece una transición ultravioleta en 364.5 nm. La observación de esta última, puede realizarse simplemente colocando como pantalla de la luz difractada por la red, un papel blanco común. El pulso es tan intenso que hace fluorecer al papel, observándose un azul profundo como señal. Esta transición corresponde a la emisión del Xe VII (seis veces ionizado).

Ya observada la emisión UV-VIS, resta encontrar la forma de generar láser IR. La operación es sencilla y se inicia fundamentalmente a presiones elevadas.

Coloquemos el detector de PbS o similar frente al espejo de salida e iniciemos la descarga. La señal en el osciloscopio que seguramente surgirá, dará la pauta de lo que estamos observando, si es que conocemos la forma de separar emisión espontánea, que sí existe, de emisión estimulada. Tapando el espejo trasero, la contribución en la señal será casi totalmente espontánea, pero si permitimos la operación del espejo, lo que sobrepase netamente la señal anterior corresponderá a emisión estimulada.

El análisis de la radiación se realiza por los mismos medios expuestos para la región visible y las principales líneas láser que aparecerán estarán dentro de la siguiente lista: 904.5 nm, 1732.5 nm y 2026.2 nm. Todas estas transiciones corresponden al Xe neutro (Xe I).

Es muy importante hacer notar que la mayoría de las transiciones láser más intensas en IR, aparecen usando solamente el espejo trasero sin cavidad resonante. Esto quiere decir que si en la operación anterior quitamos el espejo delantero, la mayoría de las líneas operarían generalmente con mayor intensidad. Estas son transiciones de alta ganancia [3], también llamadas “superradiantes”. Esto significa que, la radiación que se genera

en un extremo del tubo de descarga, viaja por él, llega al espejo colocado en el otro extremo y en su retorno al punto inicial, alcanza el grado adecuado de amplificación. Esto quiere decir que un láser puede operar sin la cavidad, - un solo espejo - sin perder las cualidades que tiene su radiación. La sigla LASER no menciona la cavidad resonante, ya que sólo habla de amplificación de luz por efecto de la emisión estimulada. Además, trabajos realizados con láseres superradiantes de  $N_2$  [4], muestran que el haz de luz emergente es intenso y contraído por debajo de lo que marcaría una proyección geométrica de la radiación espontánea generada dentro del tubo de descarga a la salida del mismo.

## 5. Otros resultados y aplicaciones

Las posibilidades que ofrece el equipo láser al poder cambiar elementos que los componen y/o condiciones de operación, permiten obtener una serie de resultados que incorporan, a los ya desarrollados temas de enseñanza, nuevas alternativas de estudio e investigación.

Cuando se trabaja con Xe puro, obtener emisión visible y ultravioleta requiere operar al sistema entre 1 y 10 mTorr de presión. Una mezcla de He-Xe (90% He - 10% Xe), permite observar un espectro similar sin requerir presiones tan bajas, que muchas veces son difíciles de alcanzar. Además, otros estudios realizados con este tipo de descargas señalan la importancia del agregado de He, ya que contribuye a obtener altos grados de ionización.

Tener la posibilidad de contar con espejos de diferente reflectividad o recubrimientos especiales para distintas regiones de operación del láser y además energías suficiente para alcanzar altas corrientes, permite obtener un importante grupo de transiciones que cubren desde el UV al IR. El listado de las principales líneas que se observan, es el siguiente:

324.7 nm Xe VIII	430.6 nm Xe V	904.5 nm Xe I
335.0 nm Xe VIII	495.4 nm Xe V	1732.5 nm Xe I
364.5 nm Xe VII	500.8 nm Xe V	2026.2 nm Xe I
380.3 nm Xe V	515.9 nm Xe V	
	526.0 nm Xe V	
	535.3 nm Xe V	
	539.5 nm Xe V	
	595.6 nm Xe V	

Es necesario hacer notar que si se cuenta con una red plana de difracción, ésta puede operar como espejo trasero selectivo. Esto quiere decir que montando la misma sobre un sistema  $x - y$ , se puede seleccionar luego de una buena alineación, la longitud de onda a reflejar, haciendo girar la red alrededor de un eje paralelo a las líneas de rayado de la misma. Esto permite operar al láser en esa única transición. Es importante hacer notar, que no todas las líneas tienen la ganancia suficientes para poder hacer factible esta operación, pero se trata de un buen ejercicio operar la cavidad de esa manera.

Otra alternativa resulta, en el caso de contar con espejos diseñados para la región UV lejano. Estos son

casi totalmente transparentes para VIS-IR por lo que, colocando uno de ellos dentro de una cavidad diseñada, por ejemplo, para el visible, la operación no es perturbada por su presencia. Además, se puede operar un láser VIS y/o IR con un espejo de salida especial para UV.

Esto permite superponer dos cavidades en el medio activo del láser, es decir una super-cavidad con tres espejos, dos para UV y uno para VIS, lo que conduce a obtener simultáneamente radiación UV-VIS-IR. La Fig. 5 muestra la forma de emplazar los espejos.



Figura 5 - Disposición de los tres espejos en la superposición de dos cavidades resonantes.

El efecto que se obtiene al liberar rápidamente la energía almacenada en el capacitor, genera un pulso corto de corriente que atraviesa el gas concentrado en el tubo de descarga. Esto produce un campo magnético alrededor del mismo, responsable de una contracción dinámica del plasma, conocido como Efecto Pinch pudiendo demostrarse que la acción láser ocurre dentro del volumen de esa contracción [5]. Por lo tanto, el perfil del pulso muestra que la zona de mayor concentración de corriente se encuentra en el centro del tubo de descarga.

Al observar la emisión del láser en la región UV-VIS, lo descrito en el párrafo anterior cobra mayor credibilidad, ya que las transiciones de menor grado de ionización, en nuestro caso Xe V, llenan o aparecen en los bordes del frente de onda. En cambio, las correspondientes a un ion superior, en nuestro caso más común Xe VII, se encuentran en el centro del mismo.

Es importante hacer notar que bajo ciertas circunstancias experimentales, se logra visualizar un aro azul-verde perfectamente delimitado, con un radio interior cercano a los 2/3 del radio total de la mancha. Parte de lo mucho que no se conoce sobre este tipo de descargas, está relacionado con este tema.

La Fig. 6, muestra el resultado de lo descrito en los dos últimos puntos de este capítulo.

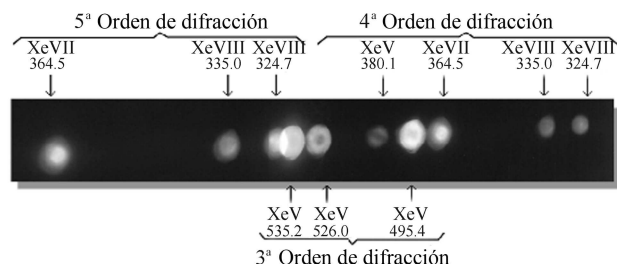


Figura 6 - Proyección sobre una pantalla de la luz difractada por una red plana sobre la que incide directamente el haz del láser.

La red colocada a la salida del sistema de tres espejos, difracta la luz VIS-UV del láser y una pantalla de papel recoge los órdenes superpuestos principales de la misma. La línea 526 nm correspondiente al Xe V, muestra nítidamente el aro mencionado, mientras que los spots que surgen de las transiciones correspondientes al Xe VII y VIII son llenos y de un radio inferior a las que pertenecen al Xe V.

Una aplicación importante del láser de Xe es, a través del bombeo óptico, gestar la operación de otro láser. La primera experiencia en nuestro caso [6], se realizó concentrando la totalidad de las líneas visibles, con una potencia de 4 kW, en un Dye Laser comercial que operaba con una solución de Rhodamina 6 G en Ethylene Glycol (concentración  $2 \times 10^{-3}$  M). Esto generó 400 W de salida del Dye que podía ser sintonizada entre 582 y 630 nm

Otras aplicaciones de la emisión generada por el láser de Xe, muestran la importancia, - dentro de la gama de ejemplos para la enseñanza presentados -, de las características de dicha emisión, ya que poseer radiación de potencia, polarizada linealmente y con un alto grado de coherencia, presenta la oportunidad de nuevas formas de uso.

Al observar, usando las líneas visibles, hologramas registrados con láser en su forma más convencional, aparece además de la lógica imagen virtual, la real, ya que la potencia y coherencia de la radiación influyen notablemente en tal observación.

Experiencias elementales con luz polarizada, se ven incentivadas por el agregado de la potencia de la misma.

El uso de la emisión en un interferómetro de Michelson como fuente luminosa, permite medir la longitud de coherencia de cada una de las líneas visibles del láser.

Finalmente, es necesario resaltar que toda la infraestructura experimental puede ser usada para operar, con cambios menores, otros láseres gaseosos como el de Nitrógeno molecular con emisión en UV-VIS-IR, ya que el mismo es otro claro ejemplo de dispositivo capaz de generar radiación estimulada en distintas regiones del espectro de manera simple.

La estructura de bandas que conforman la emisión del láser de Nitrógeno, no permite una observación o interpretación elemental de las transiciones que componen las mismas, hecho que conspira con el rol de equipo didáctico para la enseñanza, aunque la operación del mismo constituye una forma de entender como se trabaja en física experimental.

Todo lo detallado en este punto del trabajo, reafirma las posibilidades del uso del láser de Xe multi-iónico pulsado y su equipamiento adicional, en la enseñanza y además, proyecta al mismo para iniciar otros estudios, teniendo en cuenta las características tan particulares de su emisión y las oportunidades de cambio y uso del equipo experimental.

Con el fin de complementar esta descripción fenomenológica del desarrollo de un láser de laboratorio y sus

aplicaciones en la enseñanza, en la que surgen términos que no siempre han sido empleados en cursos de grado o posgrado y se incorporan nuevos conceptos teóricos relativos al tema, es necesaria una lectura más rigurosa en relación con la óptica, la espectroscopia y la física del láser, sumado al conocimiento y descripción de distintos tipos de emisores de radiación estimulada [7]. Todo es, permitirá tener un marco adecuado para un mejor entendimiento de cómo y porqué funciona un láser.

## 6. Conclusiones

Desde el inicio de nuestra tarea en 1969, la estructura básica del láser de Xe pulsado generó una serie importante de trabajos de investigación, fundamentalmente mediante el uso del tubo de descarga (sin espejos) como fuente luminosa en espectroscopia atómica de emisión.

Por lo tanto, durante el transcurso del tiempo, se trabajó intensamente en el mejoramiento del equipo experimental con el fin de maximizar su emisión espontánea y estimulada, aumentando la energía de excitación del plasma y por ende alcanzando grados más altos de ionización.

El comienzo del uso del láser en la enseñanza, lo marcan los primeros trabajos de Licenciatura y Doctorado y el empleo del equipo en cursos de grado y posgrado realizados en el CIOp a partir de 1980.

Numerosos alumnos de Universidades Argentinas y Latinoamericanas, han observado demostraciones, participado de prácticas y trabajado con los diversos equipos desarrollados, algunos de los cuales han sido transferidos a grupos seleccionados, para su iniciación en la investigación científica experimental.

Lo importante de la experiencia descrita en este trabajo, es que se trata de una propuesta abierta a nuevos resultados, ya que el Grupo de Espectroscopia Atómica del CIOp, sigue realizando investigaciones basadas en el dispositivo experimental aquí descrito, lo que implica oportunidad de interacción con laboratorios interesados en el tema.

## Agradecimientos

Este trabajo contó, con el apoyo económico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y con el aporte de Investigadores y Profesionales de Apoyo del CIOp.

## Referencias

- [1] E.B. Saloman, J. Phys. Chem. Ref. Data **33**, 765 (2004).
- [2] H. Sobral, M. Raineri, D. Schinca, M.Gallardo and R. Duchowicz, IEEE J. Quantum Electronics **35**, 1308 (1999).

- [3] O. Andrade, M. Gallardo and K. Bockasten, *Appl. Phys. Lett.* **11**, 99 (1967).
- [4] M. Garavaglia, M. Gallardo y C.A. Massone, *Anales CIC Bs. As. Inf.* **12**, 1 (1974).
- [5] A. Papayounou, R. Buser and I. Gumeiner, *IEEE J. Quantum Electronics* **9**, 580 (1973).
- [6] M. Gallardo, R. Duchowicz, J. Tocho, H.F.R. Sandoval and M. Garavaglia, *IEEE J. Quantum Electron.* **15**, 541 (1979).
- [7] Bela A. Lengyel, *Lasers* (Ed. Wiley-Interscience, New York, 1971), 2<sup>a</sup> ed.