

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

TESIS

para optar al título de Dr. en Física

sobre LASER PULSADO DE XENON

presentada por el Lic. Eliseo Gallego Lluesma

La Plata, marzo de 1972

**L A S E E D E X E N O N**

Lic. Euseo Gallego Luesma

1972

**A mis  
papás  
esposa  
e hijita**

## INDICE

	<b>Página</b>
<b>Cap. I</b> <b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Cap. II</b> <b>Antecedentes espectroscópicos                   en el laser de xenón</b>	<b>19</b>
<b>Cap. III</b> <b>Equipo Experimental</b>	<b>29</b>
<b>Cap. IV</b> <b>Discusión de Resultados</b>	<b>33</b>
<b>Cap. V</b> <b>Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

**There is surely no branch of science  
more ancient than study of light  
Arthur L. Schawlow**

**CAPITULO I  
Introducción**

El laser es por definición un dispositivo que genera y amplifica luz valiéndose de la emisión estimulada (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Los elementos comunes a estos dispositivos son: el medio empleado para lograr la amplificación en una región de frecuencias muy estrecha, (que puede ser un sólido cristalino, gaseoso, líquido o semiconductor) que interviene con dos niveles de energía entre los cuales tiene lugar la inversión de población; un par de espejos altamente reflectantes que realizan el mecanismo de realimentación y la fuente que provee la energía necesaria para excitar los átomos o moléculas del medio amplificador.

El principal problema a ser resuelto en la creación de este dispositivo es establecer y mantener la inversión de población ya que naturalmente el sistema tiende al equilibrio térmico y por lo tanto a oponerse a la inversión de población.

Para entender como tiene lugar dicha inversión nos restringiremos a un laser gaseoso. Las condiciones de equilibrio que existen normalmente entre los niveles de energía de un gas mantenido a una temperatura absoluta  $T$  suponiendo que sigue la estadística de Maxwell-Boltzmann (lo que significa una razonable suposición en la mayoría de los casos) nos indica que la relación de población entre los dos niveles

será:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{(E_2 - E_1)/kT} = e^{h\nu/kT}$$

Es decir la Termodinámica nos impone que el nivel superior tiene menos población que el nivel inferior. Si una radiación de energía  $h\nu$  incide en el gas, ella será absorbida llevando algunos átomos o moléculas del estado inferior  $E_1$  al estado

superior  $E_2$ . Procesos de emisión espontánea tanto como procesos térmicos llevan átomos del nivel superior al inferior y ayudan a mantener la temperatura de equilibrio, así cuando materia y radiación están en equilibrio térmico, no ocurre absorción o emisión neta, pues el número de ellas por unidad de tiempo es la misma. Pero si de alguna forma la población relativa de los niveles es invertida  $\left(\frac{N_1}{N_2} < 1\right)$  resultará que la emisión será mayor que la absorción, es decir, saldrán más fotones  $h\nu$  que los que llegan resultando una amplificación neta de la radiación a esta frecuencia. Dado que más átomos son desexcitados que excitados, el nivel superior se vacía y por ende la amplificación va disminuyendo hasta que el equilibrio térmico es reestablecido. Por tanto para mantener una constante amplificación, es necesario llevar el nivel superior o quitar átomos del nivel inferior de alguna forma.

Esto nos ilustra que la inversión de población está fuertemente ligada a las vidas medias de los niveles de energía.

Pérdidas en las paredes del tubo y los espejos por reflexión, difracción y dispersión hacen que la amplificación no tome valores infinitos, lo que conocemos como saturación de la amplificación.

Por último, un sistema en un nivel de energía excitado puede caer a un nivel de energía más bajo en forma espontánea o puede ser inducida (o estimulada) a caer al nivel más bajo con la emisión de radiación, si la radiación  $h\nu = E_2 - E_1$  incide sobre la muestra (Einstein, 1917 [1]).

Por tanto la radiación inducida es el resultado de la radiación incidente sobre

los átomos o moléculas de la sustancia, y en consecuencia oscilaciones atómicas forzadas llevan una diferencia de fase constante con la radiación incidente. Esto significa que todos los átomos radían en fase y por lo tanto la inducida es coherente. Por otro lado, las transiciones espontáneas ocurren al azar y no hay correlación temporal entre aquellos átomos que emiten de esa forma y en consecuencia las fases de estas radiaciones se distribuyen también al azar y decimos que la emisión espontánea es incoherente.

Aunque la definición del LASER no incluye el concepto de cavidad diríamos que emisión laser propiamente dicha es aquella que necesita de la realimentación provista por los espejos para la producción de luz coherente, denominándose SUPERRADIANTE a aquella en que las condiciones de inversión de población serían tan generosas que superarían a las pérdidas sin necesidad de la realimentación (y de los espejos).

Evidentemente entre ambas existe también una sutil diferencia, es la que se refiere a los modos de radiación ya que la radiación superradiante no posee por carecer de cavidad.

A las propiedades de potencia, direccionalidad y coherencia puede añadirse la de polarizabilidad si en los extremos del tubo continente del gas se provee de ventanas formando el ángulo de Brewster, de tal forma que la salida de luz resulta ser Linealmente Polarizada.



Son casi simultáneamente Basov [2] y Prokhorov [3], Fabrikant [4], Townes [5] y Weber [6] quienes proponen el fenómeno de emisión estimulada para obtener amplificación de la radiación.

La primera experiencia exitosa fué realizada por Gordon, Zeiger y Townes [7] en 1954 en la molécula de amoníaco, en la zona de las microondas. El efecto MASER se produjo a la frecuencia de 23,87013 GHz.

Es comprensible el hecho de que se hayan desarrollado primero instrumentos basados en la amplificación de radiación en esta zona del espectro, pues aquí las cavidades resonantes son fáciles de lograr y la noción de amplificación está sumamente ligada a los circuitos electrónicos, de esencial importancia ambos en la espectroscopía de microondas.

En 1958 Schawlow y Townes [8] indicaron las condiciones para poder extender al dominio de las radiaciones infrarrojas y visibles los dispositivos resonantes generadores de radiación electromagnética coherente. Ellos propusieron que el interferómetro de Perot y Fabry podría ser utilizado como un resonador óptico de débiles pérdidas para la dirección de rayos luminosos perpendiculares a las láminas reflectantes y remarcaron por otra parte que la técnica de bombeo óptico permitiría producir las inversiones de población correspondientes a las transiciones espectrales de frecuencias ópticas.

Las realizaciones de los láseres siguieron a estas sugerencias: Maiman [9] en 1960 realizó el primer láser de sustancia sólida sobre la transición de 6943 Å

de los iones del  $\text{Cr}^{+++}$  de un cristal de rubí ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), es de notar que este pionero había trabajado durante casi diez años en la espectroscopía del rubí. Este laser operaba en forma pulsada con periodos de espera entre pulso y pulso por problemas de disipación. Javan, Bennett y Herriot [10] en 1961 hicieron funcionar el primer laser de gas, sobre un conjunto de líneas del infrarrojo del átomo de Neón, en particular sobre la línea  $1.1523 \mu$ , operando en forma continua. Se lograba el efecto LASER en una mezcla de He-Ne situada dentro de un interferómetro de Perot-Fabry. La monocromaticidad del orden de una parte en  $10^{14}$ , la direccionalidad del haz y la coherencia resultaron ser enormemente superiores a las obtenidas en los de rubí. Esto pudo explicarse diciendo que el gas es prácticamente un medio óptico perfecto, mientras que el sólido soporta tensiones externas y no es homogéneo.

Siguieron después en 1962 el laser de juntas y los lasers de soluciones líquidas o sólidas conteniendo quelatos de tierras raras (1963), no haremos incapié en ellos.

Después que funcionó el primer laser de gas la teoría de resonadores ópticos funda su basamento en el trabajo de Fox y Li [11], quienes calcularon por integración numérica la energía existente en un resonador plano paralelo. Boyd y Gordon [12] y Boyd y Kogelnik [13] hacen lo propio para resonadores de espejos esféricos. La tecnología del laser se inclinaría poco a poco al uso de cavidades confocales o hemifocales por ser las de menores pérdidas.

El descubrimiento de la transición laser a  $6328 \text{ \AA}$  del He-Ne en 1962 operando en forma continua, por parte de White y Bigden [14] fué crucial, pues permitió demostrar la diferencia entre luz coherente y no coherente y tuvo tantas aplicaciones que puede decirse que hay más lasers de He-Ne operando en esta transición que en todas las demás de todos los tipos de lasers.

Ese mismo año comienza el empleo de fuentes pulsadas de alta y baja repetición para obtener transiciones laser que no se habían observado bajo otras formas de excitación continua, como ser radiofrecuencias, alta tensión continua o bien bombeo óptico por medio de lámparas de flash.

En 1963 la significancia del empleo de las fuentes pulsadas para obtener transiciones laser que no podían ser observadas en operación continua fué demostrada por varios investigadores. Mathias y Parker [15] experimentaron con  $N_2$  y  $CO$ , obteniendo transiciones visibles del  $CO$ . El más importante de este tipo de experiencias fué probablemente el realizado por Bell [16] en 1963, descubriendo efecto laser en vapor de mercurio ionizado accionado en forma pulsada. El descubrimiento de que la acción laser podía ser obtenida de espectros iónicos de átomos sugirió un rango enteramente nuevo de posibilidades para la acción laser en varios materiales y un gran número de investigadores volcaron sus esfuerzos hacia los lasers iónicos. Una indicación de esto último es el descubrimiento del efecto laser en iones del  $Ar$ , que fué encontrado independientemente en forma casi simultánea en varios laboratorios del mundo [17] [18] [19]. Luego se comprobó que el laser de  $Ar$  iónico podía

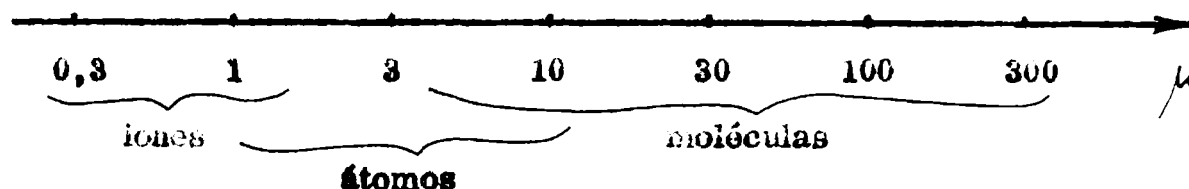
operar en forma pulsada y continua en la transición  $4651 \text{ \AA}$  [20]. Este laser de gran potencia en algunas líneas como la mencionada, tiene gran utilidad hoy en día en la Espectroscopía Raman.

El desarrollo de los lasers gaseosos hasta el presente sugiere su clasificación en cuatro tipos generales:

- a) **Lasers de átomos neutros:** que emplean descargas relativamente débiles y que tienen moderadas potencias de salida y ganancia, siendo la transición entre niveles de energía de átomos neutros en la descarga.
- b) **Lasers iónicos:** que operan en transiciones de átomos ionizados, generalmente funcionan a altas densidades de corriente, alta potencia de entrada y ocasionalmente alta potencia de salida.
- c) **Lasers moleculares:** similares a los del tipo a) pero empleando espectros moleculares. Funcionan con moderadas descargas de corriente pudiendo a veces ser operados con grandes volúmenes y altas potencias de entrada. La mayoría de estos lasers trabajan en el lejano infrarrojo.
- d) **Lasers pulsados:** este grupo es heterogéneo y se superpone con las otras tres clases, pero que incluye otros lasers que no operan en forma CW.

Según hace notar Bloom [21] las transiciones de los lasers gaseosos han sido observadas en el rango de longitudes de onda desde el ultravioleta ( $2000 \text{ \AA}$ ) a la zona submilimétrica de las microondas.

El esquema siguiente da una idea de la zona de operación principal de cada tipo.



En lo que sigue hablaremos únicamente de **laseres iónicos**.

Este tipo de **laser** se caracteriza por tres ventajas técnicas:

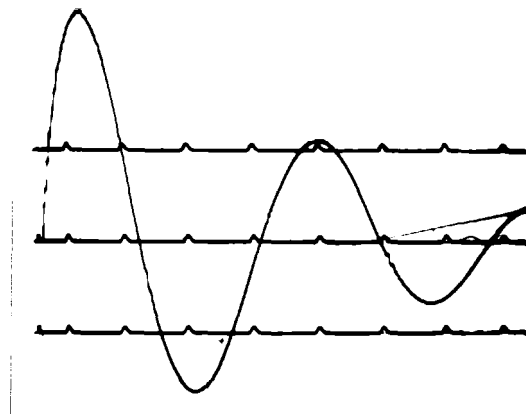
- i) **Alta potencia** (varios vatios de pico)
- ii) **Alta ganancia** (20% por metro)
- iii) **Operación en longitudes de onda visibles**.

Después que Bell encontró las transiciones **laser** en el **Hg II**, lo siguieron en forma simultánea **Bridges, Bennett y Convert** [22] trabajando en el **Ar II** (zona azul y verde). En **Kr II** y **Xe II**, **Bridges** [23] encontró líneas a lo largo de todo el espectro, de mucha ganancia. En el mercurio ionizado reportaron líneas, en la zona azul: **Gerritsen y Goederlier** [24], en el infrarrojo: **Bloom, Bell y López** [26]. Reclasificaron líneas mal asignadas y realizaron un trabajo de **fina espectroscopía** **Hockasten, Garavaglia, Lengyel y Lundholm** [25].

Hasta ahora hemos nombrado a los investigadores que trabajaron en forma pulsada. Excepto para las líneas del **Hg II** que fueron obtenidas en el **afterglow** (lo que indica un proceso de excitación más lento), la **oscilación laser** fué observada

comenzando y terminando rápidamente con el pulso de corriente. La figura adjunta muestra la gráfica de un pulso de corriente.

La operación cuasi-contínua; esto es con duraciones de pulso más largas que las constantes de tiempo de cualquier proceso atómico razonable fué reportada en Ar II por Ben-



nett y colaboradores [19] quienes obtuvieron salidas del orden del milisegundo.

La operación contínua (minutos a horas) fué obtenida al mismo tiempo por Gordon, Labuda y Bridges [20] en la mayoría de las líneas más fuertes del Ar II, Kr II y Xe II.

El movimiento del gas y los efectos caloríficos son importantes en operación contínua, de forma tal que los resultados obtenidos en operación cuasi-contínua no pueden extenderse directamente (para no decir nada de las complicaciones térmicas y estructurales causadas por el alto promedio de potencia de entrada en operación contínua).

Mc. Farlain [27] agregó líneas del O, C, N, simple, doble y triplemente ionizados en el espectro visible y en el ultravioleta.

Oscilaciones en I II fueron observadas en una descarga de I-He por Fowles y Jensen [28], las que ocurrieron solo en el afterglow similarmente a

las líneas del Hg II, implicando que el mecanismo de excitación es por colisiones con átomos de He más bien que por impacto electrónico directo.

Varias líneas del Cl II y del Ar III reportó también Mc. Farlain [29].

Líneas iónicas excitadas por choques de segunda especie fueron también observadas en los gases nobles por Laures, Danas y Frapard [30]. Estos obtienen en una descarga de Ne-Xe líneas del Xe II en ambos casos en el afterglow.

Una revisión de los gases nobles fué hecha por Bridges y Chester [31] [32], quienes obtuvieron amplificación en el Ne y otros gases nobles en líneas del ultravioleta, como así también varias en el espectro visible.

Algo similar hicieron Cheo y Cooper [33] quienes observaron nuevas transiciones en N, O y gases nobles.

Investigaciones posteriores enriquecieron todas las regiones del espectro con nuevas transiciones laser.

Vidas medias de algunas transiciones laser del Ar III han sido medidas por Bennett y co. [34]. Gordon, Labuda y Miller [35] han medido intensidades de líneas y ganancias, con el fin de determinar los procesos de población y depoblación.

Digamos algo a cerca de la espectroscopía del xenón.

Varias líneas características del xenón fueron observadas por Humphreys [36] como fuertes líneas espontáneas, pero no fueron reportadas ya que no pudieron ser identificadas.

Algunos autores que habían trabajado en varios gases nobles; no pudieron identificar algunas líneas que aparecieron siempre. Este es el caso de las cuatro líneas características del xenón ionizado a longitudes de onda 5159,04 ; 5260,17 ; 5352,89 y 5394,59 Å. tal como mencionan Bridges y Chester en sus trabajos de revisión [31] [32].

Aunque existiera mayor probabilidad que pertenecieran al Xe (por su difícil evacuado de los tubos) no se ha asegurado nada acerca de ellas.

Las cuatro líneas que fueron observadas solo en descarga afterglow se cree que aparecen de los niveles más altos que son poblados por colisiones en mezclas de gases en forma análoga al laser de He-Ne-

En todos los casos las líneas observadas en el afterglow fueron obtenidas en mezclas de gases y no pudieron ser obtenidas durante el pulso de corriente, con una excepción, la línea 5727 Å del Xe II.

En los iones del Xe se han obtenido más líneas laser que en ningún otro gas. Afortunadamente existen buenas tablas de líneas del Xe (Humphreys y co. [37] - [40]).

Pero gran cantidad de líneas no están clasificadas y muchos niveles no son conocidos, por lo que está claro que se necesita mucho trabajo para avanzar en el conocimiento del espectro del Xenón.

Un laser es iónico cuando las transiciones envueltas en la emisión estimulada de radiación ocurre entre dos niveles de un ión. En este sentido, el rubí y



las tierras raras son láseres iónicos, pero entre láseres sólidos este hecho parece no tener significancia [41].

Nuestra atención se focalizará sobre los láseres iónicos de gas operados por medio de descargas eléctricas y que operan en la zona fotográfica del espectro electromagnético, aunque muchos conceptos serán aplicables a los láseres en general.

Desde el punto de vista tecnológico una distinción debe ser hecha entre los láseres iónicos pulsados y aquellos que operan en régimen continuo, porque las características de operación de tales láseres son diferentes aún cuando los procesos físicos responsables para la inversión de población son muy similares, lo cual no es siempre el caso.

Hay láseres iónicos pulsados así como láseres atómicos que operan solo en régimen pulsado pues ellos están basados sobre una inversión de población transitoria. Frecuentemente, sin embargo los láseres iónicos son operados en descargas pulsadas aún cuando una inversión de población estacionaria puede ser obtenida en relación con la descarga; en tales instancias la operación pulsada es mantenida por razones prácticas, esto es, para dejar la disipación promedio de potencia en el tubo dentro de los límites tolerables.

En contraste con los láseres atómicos los cuales operan mayormente en el infrarrojo (la línea 6328 Å del Neón es la más corta conocida) los láseres iónicos permanecen mayormente entre 2000 y 10000 Å ( $1\mu$ ). Fuentes de radiación fuerte y coherente en este rango, son de importancia práctica, más que por

La posibilidad de observación visual directa, lo cual es posiblemente un procedimiento arriesgado, debido a la relativamente gran energía portante por cada fotón en este rango de longitudes de onda. Tales fotones hacen la detección fotoeléctrica y fotográfica muy conveniente, a tal grado de poder realizar experiencias difíciles de llevar a cabo con buen término con fotones infrarrojos. Otro punto de interés es la precisión de las medidas ya que en la zona fotográfica las técnicas están más desarrolladas y se tienen patrones con cuatro decimales de unidades Angström (  $\text{\AA}$  ).

Los iones de gases nobles: Ne, Ar, Kr y Xe son los más importantes para láseres iónicos teniendo el xenón la mayor cantidad de líneas laser de este tipo

Varios tipos y métodos de excitación se emplean para excitar láseres iónicos. Todos involucran la aplicación de un alto pico de potencia (kilovatios) sobre la descarga gaseosa. El método demanda técnicamente la operación con pulsos a lo más de un microsegundo de duración. Esto se logra cargando capacitores de baja inductancia (algunos microhenrios) del orden de 100 pF a 25 nF con una fuente de alta tensión capaz de proveer más de 10 kV y descargándolos después a través de la columna gaseosa.

La descarga es usualmente iniciada por medio de un explosor de esferas en aire o en atmósfera gaseosa cuyo potencial de ruptura en relación con la separación entre ambas y la presión del pequeño recinto está regido por la Ley de Paschen.

Este tipo de excitación es conveniente para excitar láseres iónicos de gases

nobles con presiones de gas entre 1-200 mtorr, aunque mas bajas presiones son preferidas para los gases mas pesados. Repeticiones de pulsos son reportadas en la literatura hasta valores tan altos como 2000 pulsos por segundo. Los tubos de descarga usados en tales sistemas son de diámetros de 2-5 mm. y 25-200 cm. de longitud. Estas fueron las condiciones experimentales en los trabajos de Bell [16] y Bridges [17] así como en el trabajo espectroscópico de Bridges y Chester [32].

El mecanismo por el cual una inversión de población es establecida para un par de niveles atómicos de iones varía mucho de un laser a otro. Muy poco es conocido acerca de la multiplicidad de procesos que tienen lugar en un plasma iónico. Hay razón para creer que la excitación de un átomo de Xe, por ejemplo, desde el nivel fundamental del átomo neutro al nivel inicial de una transición laser iónica tiene lugar en más de un paso; que requiere por lo menos dos impactos electrónicos (A. Papayoanou y I. Gumeiner) [42]. Esta conclusión es deducida de una variedad de observaciones, las mas convincentes son aquellas en las cuales se indica que la emisión espontánea desde el nivel laser más alto del ArII es proporcional al cuadrado de la corriente de descarga [43]. Puesto que la proporción de colisiones excitantes es proporcional a la primera potencia de la corriente, la observación anterior indicaría que dos colisiones intervienen en la excitación de los lasers de Ar II.

Mediciones cuantitativas de muchas líneas indican que la potencia óptima de salida crece proporcionalmente a  $I^6$  cerca del umbral de excitación y que esta proporción cae a  $I^4$  para valores más altos de corriente [20].

Todo parece indicar que con las fuentes empleadas hasta la fecha no se ha alcanzado la saturación en láseres iónicos.

El primer paso en el análisis teórico de la operación laser es la IDENTIFICACION de la transición que produce la radiación estimulada observada. Este proceso es llamado CLASIFICACION. En el caso de los láseres iónicos esto es en sí bastante difícil y no ha sido completado en muchos casos. El diagrama de niveles de energía de los más importantes iones de los gases nobles y halógenos es muy complicado y poco conocido, y a esto se suma el hecho de que las líneas que son observadas en emisión laser rara vez son las más intensas de las vistas en los espectros de emisión espontánea. La razón de esta falta de coincidencia entre las transiciones laser y las líneas más fuertes del espontáneo es inherente a la física de la operación laser. La operación laser demanda la generación de una inversión de población o llenado del nivel superior de los dos niveles en juego con la transición. Por otro lado, una línea fuerte del espectro es precisamente aquella que tiene una gran probabilidad que un átomo que es depositado en el nivel superior decaiga espontáneamente a rápida velocidad al estado más bajo.

Una de las razones de la complejidad del diagrama de niveles de energía de los gases ionizados es el comportamiento de los electrones del ión.

Cuando es simplemente ionizado, una coraza de cinco electrones  $p$  permanece en la orbita exterior. La excitación de este ión lleva a uno de estos cinco electrones a una orbita más alta, dejando una coraza en una configuración  $ns^2 np^4$  con un electrón externo en una órbita  $(n+1)s$ ,  $(n+2)s$ ,  $(n+1)p$ ,  $(n+2)p$  o  $(n+1)d$ .

La coraza puede quedar en una configuración  $^3P$ ,  $^1D$  o  $^1S$  y el completo sistema de configuraciones iónicas encierra las combinaciones de cada una de estas corazas con las posibles configuraciones del electrón externo.

Una situación similar prevalece en todos los gases nobles y la complejidad crece cuando se va del primero al segundo ión.

Esto no implica que los espectros iónicos de todos los elementos se vuelven progresivamente más complicados, pero esto es verdad de los elementos de las dos últimas columnas de la tabla periódica y justamente esos son los más importantes materiales laser.

Los niveles de energía atómicos e iónicos son calculados de observaciones espectroscópicas [44].

Aunque las tablas están razonablemente completas para átomos neutros, ellas tienen vacíos cada vez mayores (como es el caso del xenón) conforme crece la ionización.

Líneas laser iónicas han sido ocasionalmente observadas envolviendo transiciones entre niveles aún no tabulados. En otros ejemplos una clasificación definida no puede darse con certeza, pues dentro del error de la medida efectuada, varios

pares de niveles pueden ser los responsables de la línea observada. En estos casos las reglas de selección ayudan en la clasificación, pero ellas deben ser aplicadas con discreción a causa de los esquemas de acoplamiento que rigen en cada caso.

El catálogo más comprehensivo de líneas laser iónicas, compilado por Bridges y Chester [32] fué publicado en 1965 y contiene 230 líneas, 180 de ellas ya clasificadas.

Cuando una línea laser es clasificada, la pregunta que surge es que tipo de transiciones están favorecidas y porqué proceso detallado hace la inversión de población favorecidos a ese par de niveles. La respuesta a estas preguntas es lo que se conoce como MECANISMOS y rara vez son respondidas, aunque algunos procesos se han ido explicando.

Se ha encontrado que las transiciones laser rara vez ocurren con un cambio de configuración de la coraza. La mayoría de las transiciones ocurren con corazas  $^3P$ , unas pocas entre niveles con corazas  $^1D$  y ninguna involucrando niveles con corazas  $^1S$ .

Muchas líneas laser se originan en un nivel  $n p$  y terminan a uno más bajo  $(n-1) s$  ó  $(n-1) d$ . Ha sido propuesto que la sobrepoblación de los niveles  $n p$  es el resultado de transiciones tipo cascada desde niveles más altos y que la favorable poca población de los niveles  $n s$  y  $n d$  es consecuencia del hecho de que estos niveles drenan rápidamente al estado fundamental del ión.

El estudio detallado de una línea laser de un ión simple desglosa hechos algo diferentes de los observados en laseres de átomos neutros.

La ganancia en una línea laser atómica es simétrica alrededor del centro de la línea. No ocurre así en los laseres iónicos a causa de que los iones adquieren una significativa velocidad en el campo eléctrico (efecto que disminuye con el número atómico) y hay un corrimiento Doppler asociado con esta. El corrimiento de los iones desde el ánodo al cátodo causa no solo asimetría de las líneas sino también inestabilidad en la estructura de modos de los laseres iónicos [45].

Recientemente Pleasance y George [46] aplicaron el análisis del modo  $TE_{001}$  de una cavidad cilíndrica de microondas con el fin de medir densidades electrónicas en los laseres iónicos. El método consistió en medir las frecuencias resonantes de la cavidad. La cavidad resuena a una frecuencia  $\omega_0$  que difiere de aquella en ausencia de la descarga. A muy altas densidades electrónicas el plasma actúa como mensajero metálico y los campos de radiofrecuencias son excluidos del plasma. En este límite la cavidad resuena a la frecuencia  $\omega_m$  la cual puede ser medida por el llenado del tubo de descarga con Hg.

Métodos holográficos e interferométricos fueron utilizados con posterioridad con idénticos fines por Papayoanou y Gumeiner [47] en USA y por Mustafin, Protasevich y Rzhvskii [48] en la URSS.

**"...esa rama de la física y de la química que llamamos Espectroscopía, verdadera ciencia por sí sola, medio poderoso del análisis y de investigaciones y campo tan fértil en aplicaciones..."**

**Enrique Herrero Ducloux**

**CAPITULO II**  
**Antecedentes espectroscópicos**  
**en el laser de xenón.**



Desde el descubrimiento del laser iónico a la fecha han aparecido varias publicaciones dando resultados obtenidos a cerca del laser de xenón y su operación en distintas transiciones correspondientes a iones del xenón pero, la inseguridad es puesta de manifiesto en lo que se refiere -a que ión- pertenece cada línea espectral.

Daremos un resumen de estos trabajos y de sus conclusiones más importantes en forma cronológica.

En mayo de 1965, DAHLQUIST [57] observa el espectro espontáneo del Xe sacando los dos espejos del laser. Trabajando con presiones entre .5 a 3 mtorr y capacidades de 20 a 100 nF cargadas a 5 kV, en tubos de un metro de longitud y diámetros comprendidos entre 5 y 6 mm.

Supone que las líneas laser:	4954.2	
	5007.8	
	5159.1	con error $\pm 0.15 \text{ \AA}$
	5353.0	
	5395.7	
	5955.7	

corresponden a transiciones desconocidas del Xe I, Xe II ó Xe III y fundamenta esta asignación diciendo que: a) no observa impurezas (el laser puede funcionar durante días) b) la presencia de líneas espontáneas del XeII que comienzan en niveles elevados aparecen con intensidades mucho mayores de las conocidas en los trabajos anteriores c) las condiciones de excitación son diferentes a las comúnmente utilizadas en la observación de espectros. En sus experiencias podría

haber (en su opinión) colisiones electrónicas múltiples para excitar los niveles superiores del xenón en sus distintos grados de ionización.

Evidentemente esta ha sido la investigación que posee condiciones experimentales mas próximas a las logradas por Gallardo y as. [50] .

En junio de 1955 CHEO Y COOPER [33] , trabajando con gases nobles, N y O en tubos de un metro de longitud y diámetros 2 y 4 mm. excitan descargando con una tiratrón un capacitor de 650 nF a 3-12 kV; obteniendo pulsos de 5-2000 Amp. y duraciones de 10-1000  $\mu$ s. Las presiones óptimas estuvieron en el rango de 1 a 100  $\mu$  de Hg.

En el Xe dan a conocer once líneas laser que no figuraban en el espectro espontáneo.

BRIDGES y HALSTEAD [58] en abril de 1966 publican que: trabajando con tubos de  $l=46$  cm. y  $\phi = 4$  mm. de cuarzo refrigerado con agua, con xenón a una presión de .2 torr, corriente de descarga de 45 Amp. y un campo de 500 gauss, obtienen oscilación de dos líneas conocidas del Xe II operando en forma continua

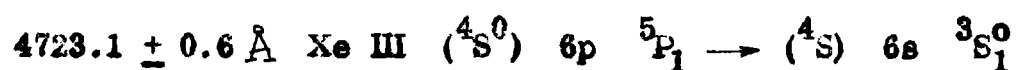
5260.43 Å  
6528.65

Incrementando a 2 torr la presión oscilaban las líneas del Xe III

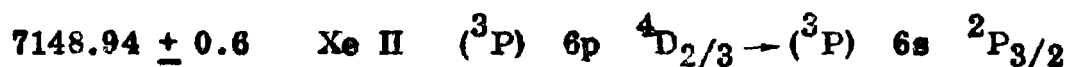
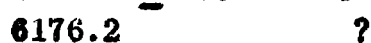
4673.68 Å  
4869.46  
5238.93  
6524.39

así como la línea 4748.82 que es supuesta del Xe III ya que solo aparece en las listas de Humphreys sin publicar [36].

En agosto y noviembre del mismo año NEUSEL [59] [60] hace publicaciones referentes al tema. Reporta y clasifica líneas laser en el xenón, estas son:



vista por Humphreys a 4723.57



clasificación que corresponde a 7149.03

estas fueron obtenidas con tubos de longitudes 33, 38 y 50 mm. y diámetros de 1.5 y 2.4 mm. a presiones óptimas entre 4.5 y 21.5 mtorr con pulsos de 30 Amp. de pico y 60  $\mu$ s de duración con repetición de 60 Hz.

ERICSON y LIDHOLT [61] publican en febrero de 1967 el haber obtenido superradiancia en líneas conocidas del XeII y Xe III usando tubos de longitud de 70 cm. y diámetro de 3 mm. descargando capacitores de 1.5 nF que producen pulsos de 1000 Amp y 25 ns cuando la presión es de .1 torr. Todas las líneas vistas son "self terminating" con un ancho medio de 2 a 5 ns. y estaban clasificadas.

En marzo de 1969 JARET y BARKER [63] publicaron la obtención de una enorme potencia en operación laser de la línea ya reportada con anterioridad a

5353 Å e indican como BRIDGES y CHESTER [32] que puede ser del Xe III.

En setiembre de ese mismo año, BRIDGES y MERCER [64] publican un hermoso trabajo donde se reportan en operación continua las líneas ya observadas con anterioridad por Bridges y Chester [32] y asignadas al Xe III.

4954.16 Å	
5007.78	
5159.06	grupo 1
5352.88	
5394.59	

estas líneas sin clasificar habían sido ya vistas en espontáneo por Humphreys 36

Al mismo tiempo obtuvieron en operación continua las líneas del Xe III identificadas

4673.68 Å	
4683.54	
5238.93	grupo 2
5524.39	

ambos grupos en aproximadamente las mismas condiciones experimentales.

Sin embargo, cuando se incrementaba la corriente de excitación (hasta 64 Amp) el grupo 1 se saturaba mientras que las del grupo 2 seguían creciendo en intensidad. El segundo grupo opera mejor a presión más elevada que el primero (hasta .5 torr). En ambos casos se utilizó campo magnético. Una variación en  $+dB/dt$  produce una disminución de la intensidad del grupo 2 y un incremento del grupo 1. Esto sugeriría que el grupo 1 pertenece al Xe IV. La experiencia de correlación temporal entre emisión laser y espontánea dió como resultado: a) Las cinco líneas del grupo 1 se originan en niveles diferentes. b) Dichos niveles no pertenecen al

Xe II o Xe III conocidos. c) Encontraron alguna correlación con líneas espontáneas sin publicar de Humphreys. d) La línea laser 3330.78 Å mostró un cierto grado de correlación con al menos tres de las cinco líneas del grupo 1. Lo que podría interpretarse como que se originan en un mismo multiplete. e) Calculando a partir de los niveles de energía del Xe III y Xe IV [44] no encontraron transiciones que encuadraran a menos de  $5 \text{ cm}^{-1}$ , no obstante pensaron que podrían ser del Xe IV, y en ese caso estas serían las primeras líneas laser continuas en un ión triple.

En enero de 1970, PAPAYOANOU y GUMEINER [65] dan a conocer sus resultados experimentales. Utilizan un tubo de cuarzo de longitud 105 cm. y de 10 mm. de diámetro, con electrodos a 90 cm. entre sí. Descargan un capacitor de 25.6 nF y el pulso de corriente tiene 1.4 us de ancho y de 1.4 a 3 kA de pico. Miden los pulsos de luz con un fotomultiplicador ITT S-20 y un osciloscopio Tektronix 519, el pulso de corriente con una espira conectada a una unidad Tektronix Tipo O.

Con distintos espejos dieléctricos obtienen elevada potencia de salida en las

siguientes líneas:	* 3645.5 Å Xe?	5007.8 Å Xe IV?
	3808.3 Xe?	5159.1 Xe IV?
	3972.9 Xe?	* 5261.9 Xe?
	4060.5 Xe III clasif.	* 5352.9 Xe IV?
	* 4305.8 Xe III clasif.	* 5394.6 Xe IV?
	* 4954.2 Xe IV?	

Es decir, de estas líneas algunas no saben si verdaderamente son del xenón y salvo las ya clasificadas adoptan como Bridges y Chester a sugerir que son del Xe IV. Para las líneas más intensas (\*) controlaron la salida laser en función de la presión y la corriente. La variación es similar en todas, aunque el umbral y la presión óptimas fueron diferentes y resultaron consistentes a otras observaciones hechas en el argón.

Las líneas verdes tienen saturación de potencia mientras que las 4306 y 3645 Å una vez alcanzado el máximo, decrece la intensidad. La línea de 4306 Å tiene umbral en 22 kV y es curioso que las verdes (excepto la 5008 Å) que pueden ser del Xe IV tienen el umbral en 18 kV.

La dinámica de todas las líneas es tal que el efecto laser ocurre en o muy cerca del primer máximo del pulso de corriente, 350 ns. después de que comience el pulso; y el pulso de luz tiene una duración de 200 a 400 ns.

Usaron una cámara ultrarrápida para estudiar el efecto "pinch" en el plasma.

Por último sugieren que el efecto laser debe lograrse por excitación en varios pasos por sucesivos choques electrónicos.

En abril de 1971 los mismos autores [71] publican la realización de medidas espectroscópicas que han indicado que las líneas obtenidas en el laser de xenón con efecto "pinch" aparecen de transiciones en especies triplemente ionizadas (Xe IV).

Mediante medidas de la densidad electrónica dependiente del tiempo en forma

interferométrica y de la dinámica del plasma indicaron que este es en verdad el caso para las transiciones de longitudes de onda:

3247 Å	5008 Å
3331	5159
4306	5353
4954	5395

En agosto de 1971, WHEELER [70] observa con un tubo de un metro de longitud y cinco milímetros de diámetro, descargando un capacitor de 250 nF a 45 kV que produce una corriente de pico de 980 Amp. y ancho de pulso 1.5  $\mu$ s, una línea laser a  $6343.18 \pm 0.30$  Å cuyo ancho de pulso es de 500 ns.

Como vemos una larga serie de transiciones han sido reportadas. La perplejidad de la asignación de las transiciones ha llevado a algunos autores a asignar en algunos intentos a diferentes elementos y a distintos iones del xenón diversas transiciones. El factor primordial de todo este equívoco se debe al desconocimiento del espectro espontáneo. Es evidente que las tablas de niveles de energía [44] que poseen para del Xe I los últimos niveles conocidos a  $\left\{ \begin{array}{l} 97007.41 \text{ cm}^{-1} \\ 107938. \text{ cm}^{-1} \end{array} \right.$  y cuyos

límites de ionización son para el Xe I:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Xe II} \quad 2P_{3/2}^0 \quad 97834.4 \text{ cm}^{-1} \\ \text{Xe II} \quad 2P_{1/2}^0 \quad 108371.4 \text{ cm}^{-1} \end{array} \right.$$

está bastante completa. Pero desafortunadamente no ocurre igual para el Xe II cuyo último nivel conocido (el de mayor energía) está a  $157222.1 \text{ cm}^{-1}$  y el

límite de ionización está a Xe III ( $^3F_2$ )  $171068.4 \text{ cm}^{-1}$ .

Es decir, hay un espacio de casi  $14000 \text{ cm}^{-1}$  donde bien pudiera haber muchos otros niveles.

El caso es análogo y más pronunciado para el Xe III donde el espacio en blanco es de más de  $59000 \text{ cm}^{-1}$ . El nivel más energético conocido está ubicado a  $200050.37 \text{ cm}^{-1}$  y el límite está en Xe IV ( $^4S_{3/2}^0$ ) a  $259089. \text{ cm}^{-1}$ .

Para el Xe IV el hueco es muy grande, debido a que no se han conocido series que puedan suministrar el potencial de ionización y por lo tanto el límite del nivel máximo de energía del ión. El análisis de los niveles disponibles fue hecho por Humphreys basado sobre observaciones hechas por Boyce en 1936, quien obtuvo 83 líneas clasificadas en el intervalo de 558 a 1249 Å. La configuración del estado fundamental comprende tres términos  $5p^3 \ ^4S^0$ ,  $5p^3 \ ^2D^0$  y  $5p^3 \ ^2P^0$ , con cinco niveles odd y el resto de los niveles tabulados (26 niveles) son even, la mayoría de los cuales tampoco tienen determinado el J del nivel.

Ninguna transición óptica perteneciente al Xe IV es conocida a la fecha del comienzo de nuestro trabajo en espectroscopía espontánea [44] [72] [73].

Surge pues la necesidad de desarrollar una fuente espectral capaz de llenar el hueco existente en lo que se refiere a los espectros espontáneos del Xe I al Xe IV a fin de posibilitar un conocimiento mayor de los niveles de energía de dichas especies ionizadas.



La tabla siguiente contiene todas aquellas líneas laser del xenón medidas hasta la fecha con los errores correspondientes y sus referencias, que han dado lugar a discusión de alguna índole.

Línea	Long.onda	ión	Ref.	Línea	Long.onda	ión	Ref.
1	2477.18 <sub>+</sub> .06 Å	?	33	22	5007.8 <sub>±</sub> .15 Å	II?	57
2	2691.82 .06	?	33		5008	IV	69
3	2983.7 .5	III	31-32	23	5157.04 .06		67
4	3079.78 .06	II-IV?	32-33-54	24	5159.08 .03		50
	3079.7 .3	IV?	31		5159.04 .04	II?	31
5	3246.94 .06	III	32		5159.04 .04	III?	32
	3247	IV	69		5159.06	IV?	64CW
6	3305.92 .06	III-IV?	33		5159.1 .15	II?	57
	3306.4 .5		31	25	5260.1 .15	II?	57
7	3330.82 .06	IV?	31-32-33		5260.15		67
			54-62CW		5260.17 .03		50
	3331	IV	69		5260.17 .06	II?	31
8	3350.04 .06		33		5260.17 .06	II	32
9	3482.96 .06		31-32-33	26	5260.4		
10	3645.46 .06		33-54		5260.43	II	55-58CW
11	3669.20 .06		33	27	5340	V	66
12	3760.00 .04		31		5343.34 .05		67
13	3803.27 .06		33	28	5352.90 .03		50
14	3972.93 .06		33		5352.89 .06	II?	31
15	4306	IV	69		5352.89 .06	III?	32
	4305.77 .06	III	31-32		5352.88	IV?	64CW
	4305.75 .03		50		5353.0 .15		57
	4305.7 .15	III	57		5353	III?	63
16	4558.74 .06		67		5353	IV	69
17	4647.40 .04		32	29	5394.60 .03		50
18	4650.40 .1		31		5394.59 .06	II?	31
19	4723.1 .6	III	59		5394.59 .06	III?	32
20	4748.92	III	58		5394.59 .06	IV?	64CW
	4748.7 .6		59		5395.7 .15		57
21	4954.2 .15	II?	57		5395	IV	69
	4954.10 .06	III?	31-32	30	5499.31 .04		67
	4954.18 .03		50		5501	V	66
	4954.16	IV?	64CW	31	5590	V	66
	4954	IV	69		5592.35 .05	II	67
22	5007.80 .03		50	32	5659		(*)
	5007.72 .04		31	33	5955.67 .03		50
	5007.72 .04	III?	32		5955.73 .04	?-II?	31-32
	5007.78	IV?	64CW		5955.7 .15		57

Línea	Long.onda	ión	Ref.
34	6176.	.5	68CW
	6176.2		60
35	6343.18	.3	70
36	6699.60	.3	67
37	7148.94	.6	II 59
38	8569	3	56

(\*) Comunicación privada de Bell y Bloom a Bridges y Chester.

El error grosero puesto de manifiesto en algunas medidas se debe a aquellos investigadores, que estando solo interesados en la obtención de potencia no guardan reparo en medir solo a detector, dando lugar en ocasiones a burdos errores, llegando en algunos casos a confundir líneas muy cercanas.

**En la ciencia, la verificación experimental tiene un gran valor, no solamente para probar hipótesis físicas (para las cuales es, en verdad, la única comprobación valedera) sino también para descubrir falacias de razonamiento y suposiciones mal fundadas**

**Sir Arthur S. Eddington**

**CAPITULO III**  
**Equipo Experimental**

En el desarrollo de la presente investigación se utilizaron tubos de Pyrex de diámetros de 2,5; 3 y 5 mm. de un metro de longitud y 80 cm. de distancia entre electrodos, para confinar el gas. Los electrodos fueron construidos de Tungsteno y se dispusieron en un reservorio especial que no obstaculizara la visión en forma axial, tal como puede verse en la figura de la página

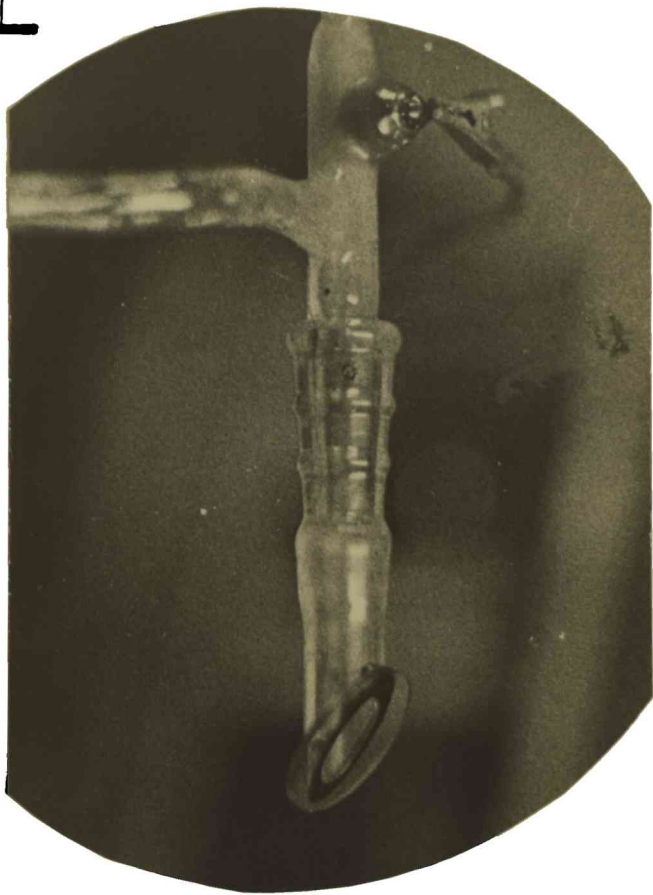
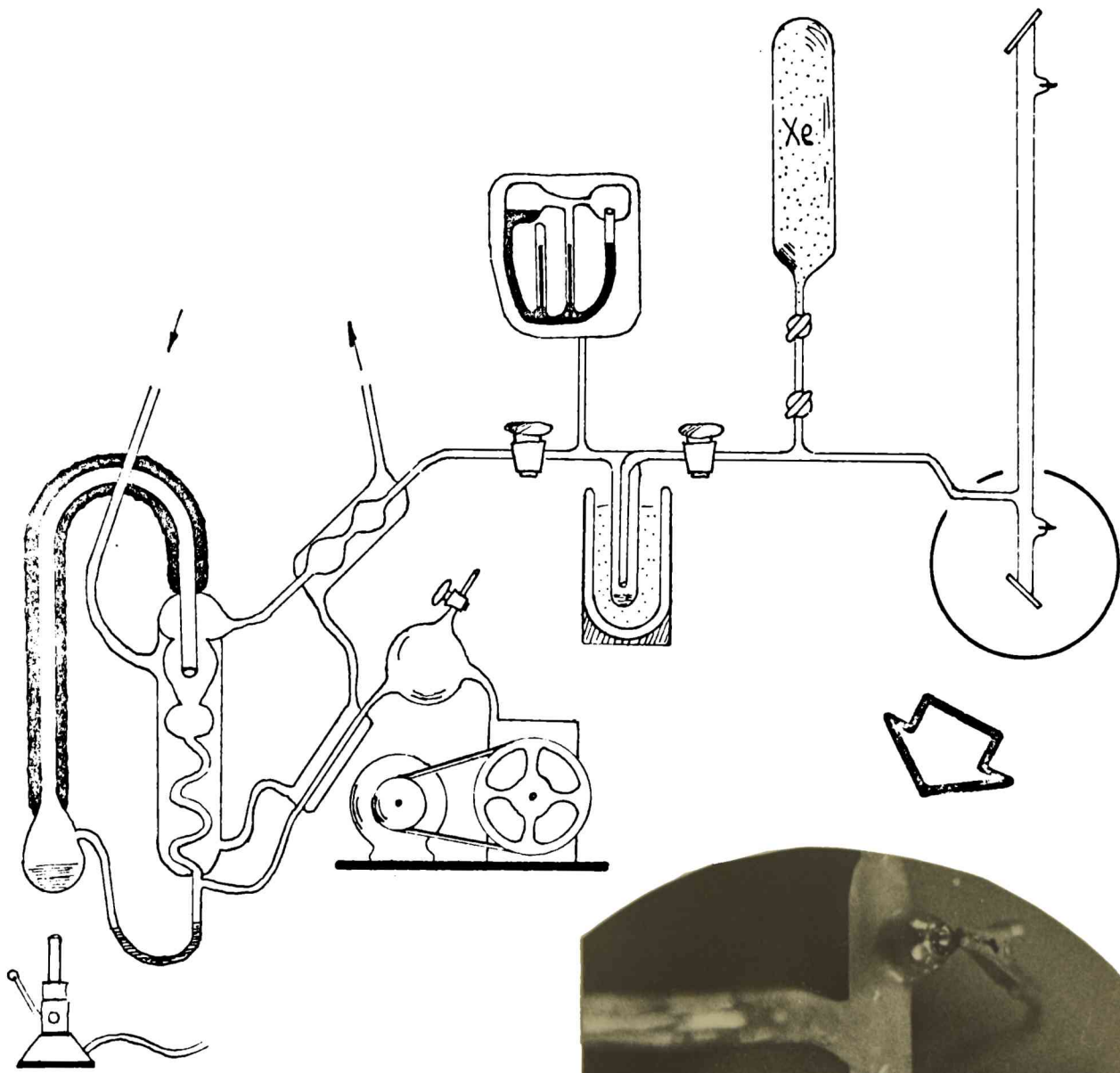
Las ventanas de cuarzo formando el ángulo de Brewster se pegaron con Pizeina a juntas del tipo cónico de tal forma que se pudiera seleccionar el ángulo de polarización de la luz, que lo hace linealmente. Las juntas cónicas se adosaron con grasa Apiezon tipo L ó M con presión de vapor entre  $10^{-10}$  a  $10^{-11}$  y  $10^{-7}$  a  $10^{-8}$  mm. de Hg. respectivamente a 20°C. Presiones estas muy inferiores a las presiones de operación.

El tubo dispuesto dentro de una cavidad confocal (que permite fácilmente el cambio de los espejos de dieléctricos o metales) era evacuado con un sistema de vacío consistente en una bomba mecánica y una bomba difusora de Hg.

El sistema de vacío posee cerrado a doble llave (por propósitos de dosificación) un balón de xenón espectroscopicamente puro.

Una trampa de aire líquido impidió el paso del Hg de la bomba difusora hacia el recinto a evacuar; la que también se utilizó para trabajar el tubo del laser a presión de vapor del xenón.

Dada la facilidad de contaminación en este tipo de trabajos ya puesta de manifiesto en trabajos previos [31][33], el tubo fué solo utilizado con xenón y



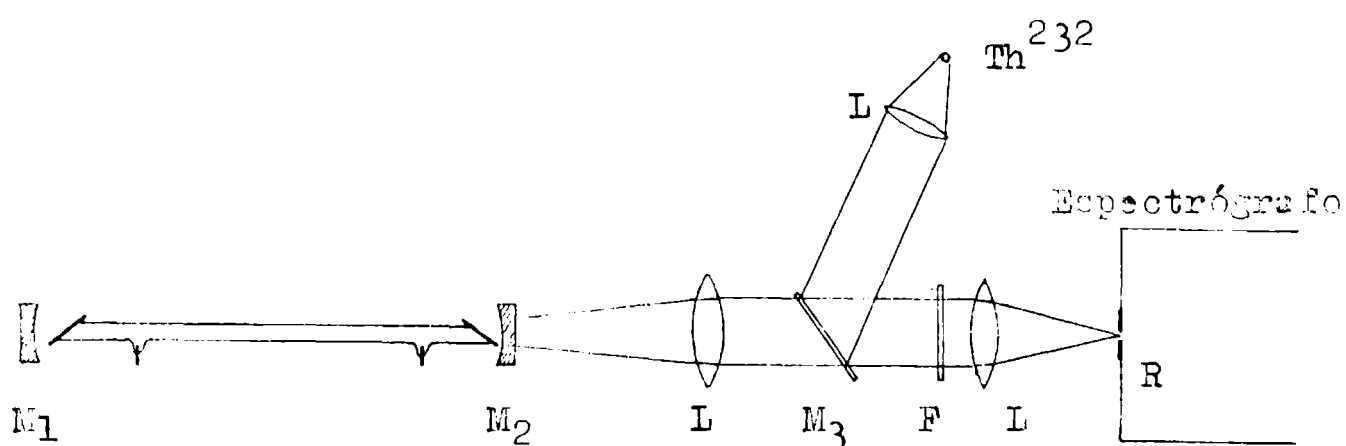
no se hizo empleo de getters para mejorar el vacío, así como no se retiró el aire líquido de la trampa hasta no haberse enfriado la bomba difusora, con la finalidad de evitar la difusión de impurezas en las paredes de vidrio del sistema.

El sistema de vacío posee un manómetro de MacLeod de diseño Bruner que fué ocasionalmente utilizado, dado que la mecánica de operación fué la siguiente:

- a) evacuado mecánico durante lo menos media hora
- b) evacuado por bomba difusora durante varias horas
- c) llenado del tubo del laser de xenón
- d) alineación de la cavidad
- e) evacuado progresivo hasta la obtención del efecto laser
- f) obtención del espectro de emisión laser
- g) retiro de los espejos de la cavidad
- h) obtención del espectro espontáneo en las mismas condiciones experimentales en que se obtuvo el efecto laser.
- i) obtención del espectro del Th con fines de medición.

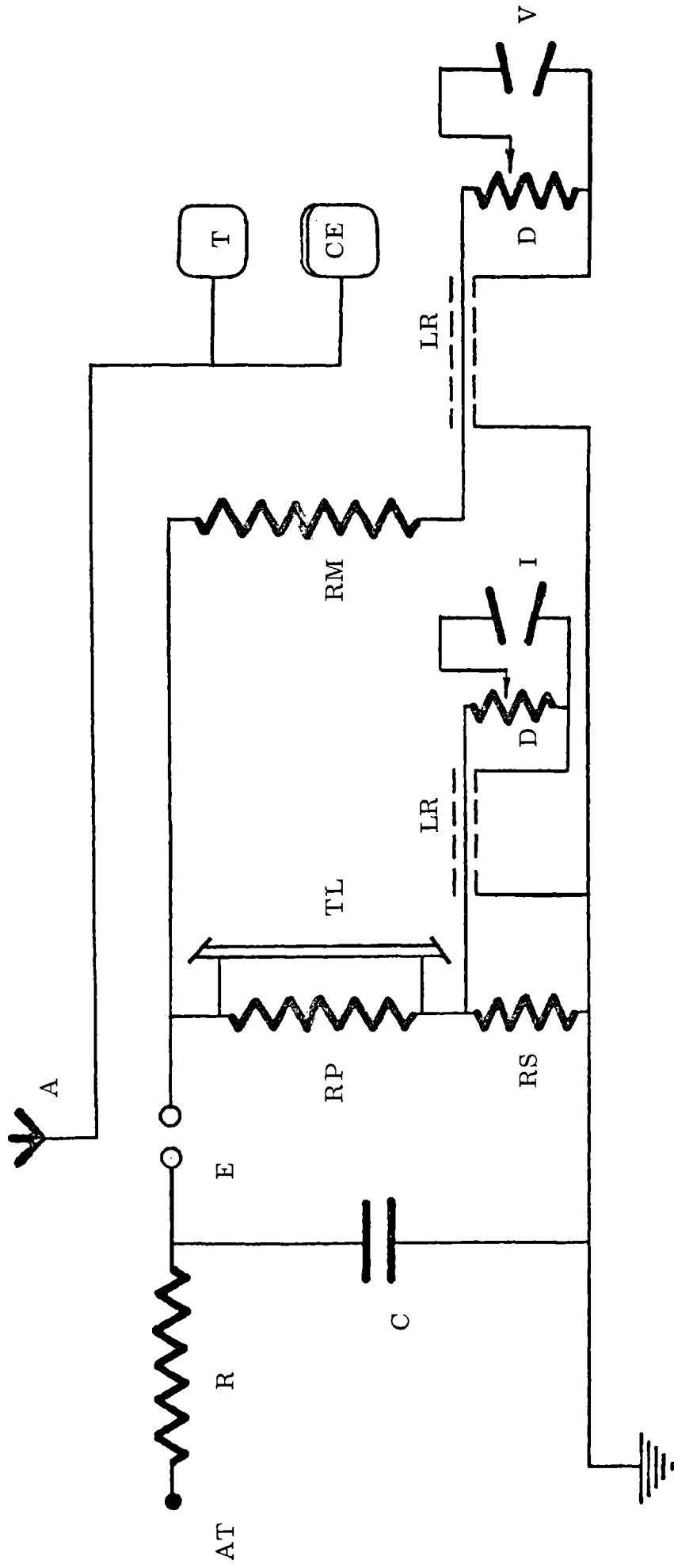
El trabajo previo a esta secuencia era en cada caso la alineación del tubo en el eje óptico del espectrógrafo mediante el uso de un laser comercial de He-Ne Spectra Physics modelo 130-C de 2mW de salida continua que opera en 6328 Å.

El dibujo de la figura permite ver la disposición experimental adoptada por ser la mas luminosa de cuantas se intentaron, con los elementos disponibles en nuestro laboraratorio. El rebatido del espejo  $M_3$  y la selección



de una abertura diferente de Hartman sin mover el resto de los elementos fué la base de las precauciones tomadas con miras a la obtención del espectro de comparación de Torio 232. El espectro de  $\text{Th}^{232}$  se obtuvo de una lámpara conteniendo Torio sólido excitado por medio de una pantalla de diatermia Raytheon (Microondas). El sistema fué excitado mediante la descarga a través de un explosor en aire de un banco de capacitores de capacidades entre 250 pF y 4 nF con inductancias individuales de .5 a 25  $\mu\text{H}$ , alimentado con fuentes de alta tensión Neutronix 22 MR-V y 23 VR (50 kV a 5mA). El circuito completo puede visualizarse en la página siguiente.

Para el análisis de la luz se utilizó el espectrógrafo Ebert de 3,4 m. de distancia focal provisto de una red de difracción Bausch-Lomb de 600 líneas



AT alta tensión positiva  
 C banco de capacitores  
 E explosor  
 R resistencia de 50 MΩhm  
 A antena de trigger  
 T trigger  
 CE contador electrónico  
 I lectura de corriente en un haz del osciloscopio

RP resistencia de preionización de 20 Mohm  
 TL tubo laser  
 RS resistencia shunt  
 LR líneas de retardo  
 RM resistencias multiplicadora de 5500 Ohm  
 D divisores de tensión  
 V lectura de tensión en un haz del osciloscopio



por milímetro de 5 x 12 cm. con refuerzo de luz en 5000 Å en el "blaze" y en 25000 Å en el "unblaze".

La visualización del pulso de luz se realizó mediante un detector Philips CVP56 alimentado con una fuente Oltronix LS<sup>529R</sup> y un osciloscopio Tektronix 503.

La visualización del pulso de tensión y de corriente se realizó con elementos suministrados por el Laboratorio de Alta Tensión de la Fac. de Ingeniería, de la Universidad Nac. de La Plata, estos fueron:

Osciloscopio Emile Haefely & Ltd Type 72, Líneas de retardo, Divisor de alta tensión, Shunt Coaxial, Cámara fotográfica de osciloscopio, Antena de trigger externa.

El registro fotográfico de las líneas espectrales con propósitos de identificación se llevó a cabo con películas Du Pont y Hilford Mark V. Al efectuar medidas se fotografió con placas espectroscópicas Kodak adecuadas a la zona espectral de interés, seleccionándose la radiación para evitar el solapamiento de órdenes espectrales mediante el empleo de filtros Cornig.

La disposición experimental detallada es la misma a que se hace referencia en el trabajo de Gallardo, Garavaglia, Tagliaferri y Gallego Llesma [50]



**"Con frecuencia tú me das ocasión de admirar la riqueza y simultaneamente la suma prodigalidad de la naturaleza, mientras de cosas tan comunes y podría decirse triviales, vas extrayendo datos tan curiosos y nuevos, y casi siempre diversos de lo que uno pudiera imaginarse..."**

**Sagredo (a Salviati)**

**CAPTULO IV**  
**Discusión de resultados**

Diferentes clases de fuentes espectrales son utilizadas para observar la radiación emitida por átomos neutros o ionizados. En general, las fuentes de luz son escogidas de acuerdo con el uso específico de investigación a realizar.

De acuerdo al análisis realizado en el campo de la espectroscopía estimulada (teniendo un laser cuyo medio activo es un gas o un vapor), se han reportado transiciones sin correlación en el espectro espontáneo conocido. Un caso típico de esto ha sido el laser de xenón ionizado. Recientemente Gallardo y as. 50 detectaron por vez primera en emisión espontánea la mayoría de las transiciones no identificadas del láser de xenón. Desde 1965 a la fecha más y más líneas laser del xenón no clasificadas han sido descubiertas, de acuerdo a lo revisado en el Cap. II.

En el curso de la presente investigación un laser pulsado de xenón fue utilizado como fuente de luz espontánea quitando la cavidad por la simple remoción de los espejos.

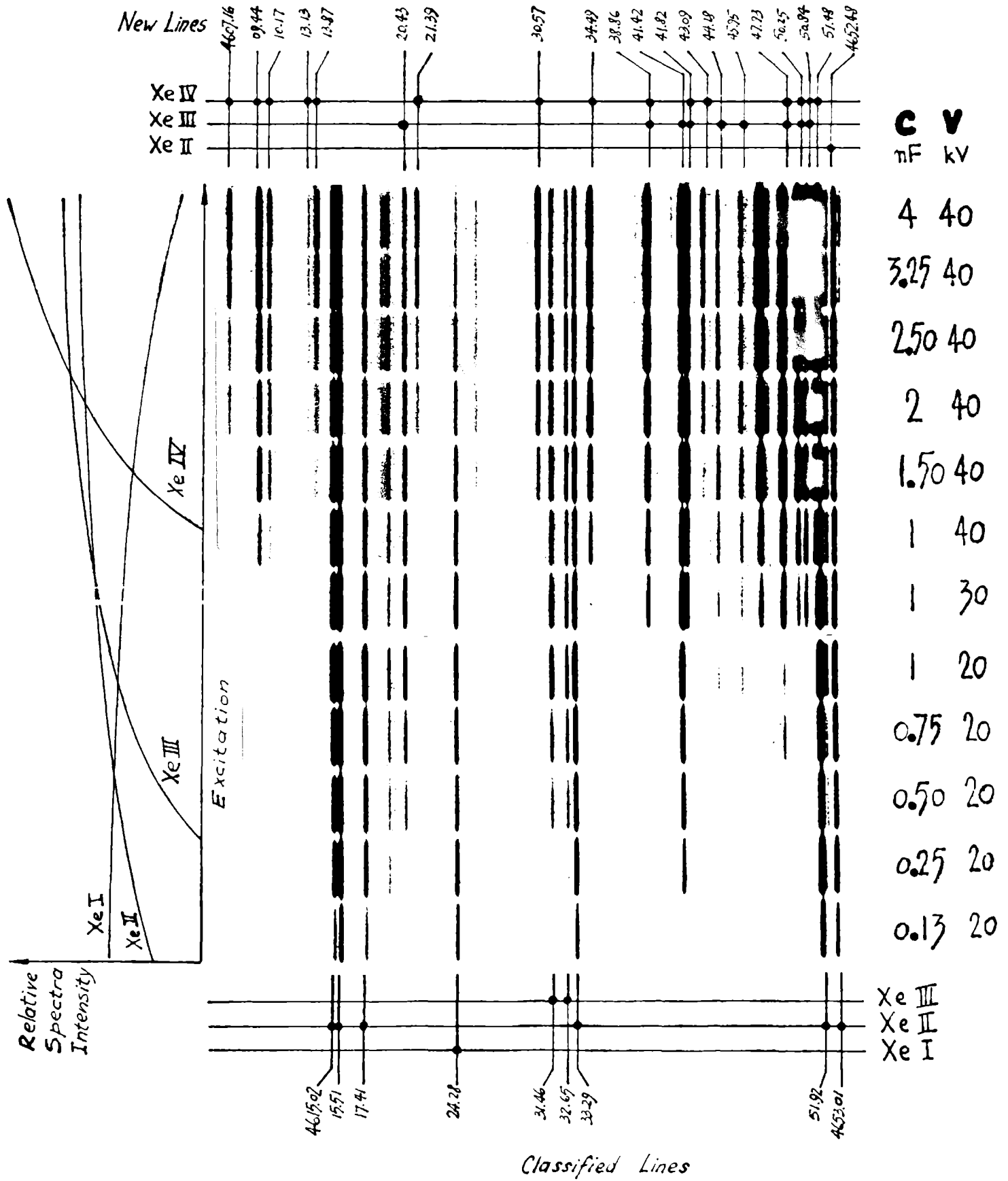
De esta forma más de 2000 líneas nuevas fueron detectadas por primera vez en nuestro conocimiento. Estas líneas aparecieron junto a las líneas no clasificadas por Humphreys en 1930-1935 en su material sin publicar.

Los espectros se midieron por comparación con las longitudes de onda del  $\text{Th}^{232}$  medido por Valero [51] [52] y Goorvitch y as. [53] en forma interferométrica. Todas las medidas se llevaron a cabo con el comparador fotoeléctrico Grant del Observatorio Astronómico de la Universidad Nac. de La

Plata. El error estimado de nuestras medidas fué de  $\pm 0.03 \text{ \AA}$  y  $\pm 0.01 \text{ \AA}$  para el primer y tercer orden de difracción respectivamente. Las pocas impurezas moleculares obtenidas se limitaron a la banda 0-0 del 2do. sistema positivo del  $N_2$  con cabeza de banda a  $3371 \text{ \AA}$  [49].

El espectro espontáneo del xenón fué fotografiado en el rango de  $2700$  a  $8700 \text{ \AA}$  con un tubo de  $3$  milímetros de diámetro. La intensidad de las líneas espectrales fué cuidadosamente analizadas en función del cambio de la energía de excitación aplicada. Dichos cambios fueron hechos variando la capacidad y/o el voltage aplicado al banco de capacitores. Como resultado de esta experiencia fué posible determinar que las líneas conocidas de los espectros del Xe I, Xe II y Xe III se comportaban en formas disimiles. La figura de la página siguiente muestra parte del espectro fotografiado donde el fenómeno antemencionado es claramente visible. La figura muestra también el comportamiento típico de intensidad de las diferentes especies iónicas junto a las condiciones de excitación.

El mismo análisis fué hecho para las nuevas líneas espectrales observadas. Así pudieron ser identificadas las especies iónicas responsables de la emisión en casi todos los casos. Las nuevas líneas espectrales fueron clasificadas como del Xe II ó Xe III. No obstante, varias líneas espectrales mostraron un comportamiento diferente en comparación con aquellas del Xe I, Xe II ó Xe III. En la figura unas pocas de estas líneas son observadas. Estas apare-



New Lines

Xe IV  
Xe III  
Xe II

C V  
 $\pi F$  kV

Relative Spectra Intensity

Excitation

Xe I

Xe II

Xe III

Xe IV

467.16

15.51

17.41

24.28

31.46

32.65

33.29

51.92

467.01

Xe III  
Xe II  
Xe I

Classified Lines

467.16  
49.44  
10.17  
13.13  
13.87  
20.43  
21.39  
30.57  
34.49  
38.86  
41.42  
41.82  
43.09  
44.48  
45.75  
47.23  
50.25  
50.84  
51.48  
467.01

cieron solo cuando la máxima excitación fué aplicada, lo cual parece indicar que son pertenecientes al xenón tres veces ionizado. De ser así, en nuestro conocimiento, estas serían las primeras transiciones observadas y reconocidas fuera de la región ultravioleta de vacío (material de Boice trabajado por Humphreys al que se ha hecho referencia en el capítulo II).

En relación a la tabla dada al final del Cap. II, haremos una discusión crítica con el fin de listarla nuevamente con la incorporación de los datos obtenidos.

La línea  $2477.18 \pm 0.06 \text{ \AA}$  observada como laser por Cheo y Cooper [33] no fué posible observarla en emisión espontánea, quizá se trate de la línea medida por nosotros a  $2477.39 \pm 0.05 \text{ \AA}$  que es nuestra línea más cercana, tal como lo asentamos en [50].

La línea  $2691.82 \pm 0.06 \text{ \AA}$  vista por los mismos autores como laser, corresponde a nuestra espontánea en  $2691.84 \pm 0.05 \text{ \AA}$  que identificamos como perteneciente al Xe III.

La línea  $2983.7 \pm 0.5 \text{ \AA}$  reportada por Bridges y Chester [31] [32] no fué observada por estos autores sino calculada, pensandola primero como impureza fué luego atribuida al Xe III. Nosotros vemos una espontánea con longitud de onda  $2983.72 \pm 0.05 \text{ \AA}$  que pertenece al Xe IV, vista por vez primera.

La línea  $3079.78 \pm 0.06 \text{ \AA}$  vista por Cheo y Cooper [33], Bridges y Ches

ter [32] y por Dana, Laures y Rocherolles [54] en emisión espontánea, fué atribuida en un principio al Xe II y después supuesta del Xe IV por Bridges y Chester [31] por las condiciones experimentales con que se daba la amplificación. Nosotros vemos en nuestro espectro espontáneo una línea perteneciente al Xe III a  $3079.71 \pm 0.01 \text{ \AA}$ .

La línea  $3246.94 \pm 0.06 \text{ \AA}$  clasificada por Cheo y Cooper como del Xe III  $6p^{1s^3} D_3 \rightarrow 5d^{1s^3} D_3^0$  a  $3246.84 \text{ \AA}$  es en realidad perteneciente al Xe IV tal como lo aseveran Papayoanou y Gumeiner [69] en base al estudio interferométrico de la densidad electrónica en el plasma. En nuestros espectrogramas obtenemos como se muestra en la fotografía, junto a la línea conocida del Xe III  $3246.85 \pm 0.01 \text{ \AA}$  la línea  $3246.97 \pm 0.01 \text{ \AA}$  perteneciente al Xe IV, confirmando entonces lo asentado por Papayoanou y Gumeiner por una vía diferente.

La línea  $3305.92 \pm 0.06 \text{ \AA}$  atribuida al Xe III ó Xe IV por Cheo y Cooper [33] y la línea  $3306.4 \pm 0.5 \text{ \AA}$  medida por Bridges y Chester [31] no sabemos si se tratan en realidad de dos líneas espectrales distintas, puesto que sus medidas se solapan

$$3305.92 \pm 0.06 \left\{ \begin{array}{l} 3305.86 \\ 3305.98 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} 3305.9 \\ 3306.9 \end{array} \right\} 3306.4 \pm 0.5$$

y en nuestros espectrogramas encontramos entre  $3305.86$  y  $3306.9$  las siguientes líneas: Xe III  $3306.85 \pm 0.05 \text{ \AA}$ ; Xe IV  $3306.06 \pm 0.05 \text{ \AA}$ ; Xe III ó IV  $3306.49 \pm 0.01 \text{ \AA}$  y por último Xe III  $3306.81 \pm 0.01 \text{ \AA}$  que era ya conocida.



En nuestra creencia ha quedado indeterminado en cual o cuales líneas se ha obtenido el efecto laser por cuanto la identificación hecha por Cheo y Cooper [33] como perteneciente al Xe III  $nx' 37_{3,2} \rightarrow 6p' {}^3D_3$  a 3306.53 Å resulta aventurada por el grosero error de sus mediciones.

La línea 3330.82  $\pm$  0.06 Å vista por varios investigadores como laser fué obtenida por Bridges y Chester [62] en operación contínua y fué entonces supuesta del Xe IV y esto fué confirmado por Papayoanou y Gumeiner [69], quienes dicen que la línea 3331 Å es perteneciente al Xe IV. Estos autores no especifican el error de sus medidas. En nuestros espectros espontáneos no hemos encontrado esta línea ni ninguna por los alrededores. Queda pues para una futura observación la posibilidad de confirmar si pertenece al Xe.

La línea 3350.04  $\pm$  0.06 Å vista por Cheo y Cooper [33] en operación laser corresponde a nuestra espontánea a 3350.01  $\pm$  0.05 Å perteneciente al Xe IV, vista por vez primera en espontáneo.

La línea 3482.96  $\pm$  0.06 Å vista como laser por Bridges y Chester [31] [32] y por Cheo y Cooper [33] fué asignada al Xe y puesta en la tabla de miscelaneas respectivamente por estos autores. Nuestra espontánea más cercana es una nueva línea perteneciente al Xe IV a la longitud de onda 3483.26  $\pm$  0.05 Å.

La línea 3645.46  $\pm$  0.06 Å observada por Bridges y Chester [33] y por

Dana, Laures y Rocherolles [54] en operación laser corresponde con nuestra nueva espontánea medida en tercer orden de difracción que pertenece al Xe IV con longitud de onda  $3645.57 \pm 0.01 \text{ \AA}$  que no se superpone con la medida hecha por Bridges y Chester.

La línea  $3669.20 \pm 0.06 \text{ \AA}$  reportada en laser por Cheo y Cooper [33] corresponde a la línea  $3669.20 \pm 0.01 \text{ \AA}$  vista en primera vez espectros espontáneos pero no podemos precisar a que ión del xenón pertenece.

La línea  $3760.00 \pm 0.04 \text{ \AA}$  dadap por Bridges y Chester [31] en la tabla de miscelaneas como una posible impureza, no es tal puesto que en nuestros espectros tenemos una línea nueva del Xe IV con longitud de onda  $3759.91 \pm 0.05 \text{ \AA}$  pudiendo asegurar que es del xenón debido a que hemos trabajado solo con este gas a diferencia de estos autores que trabajaron con todos los gases nobles.

La línea  $3803.27 \pm 0.06 \text{ \AA}$  vista en operación laser por Cheo y Cooper [33] puede ser correlacionada con nuestra nueva línea perteneciente al Xe IV encontrada a  $3803.21 \pm 0.05 \text{ \AA}$  pero advertimos de la presencia de otra línea nueva perteneciente al mismo ión próxima a esta que se midió a  $3803.02 \pm 0.05 \text{ \AA}$ .

La línea laser reportada por Bridges y Chester a  $3972.93 \pm 0.06 \text{ \AA}$  fué medida en nuestro espontáneo a  $3973.00 \pm 0.01 \text{ \AA}$  y asignada al Xe IV.

La línea laser  $4305.77 \pm 0.06 \text{ \AA}$  reportada por Bridges y Chester [31] [32] e identificada como la línea del Xe III  $4305.85 \text{ \AA}$  conocida en espontáneo [39] fué obtenida también por nosotros en operación laser y medida con más precisión a la longitud de onda  $4305.75 \pm 0.03 \text{ \AA}$  [50]. Esta línea fué nuevamente asignada al Xe III por Dahlquist [57] quien la obtuvo en operación laser a  $4305.7 \pm 0.15 \text{ \AA}$ . Posteriormente fué asignada al Xe IV por Papayouanou y Gumeiner [69].

En nuestro espontáneo aparece junto a la línea conocida del Xe III que medimos a  $4305.84 \pm 0.01 \text{ \AA}$ , la línea perteneciente al Xe IV:  $4305.71 \pm 0.01 \text{ \AA}$  tal como puede apreciarse en la fotografía siguiente.

La línea  $4558.74 \pm 0.06 \text{ \AA}$  reportada por Hoffmann y Toschek [67] en emisión estimulada fué encontrada en nuestro espectro espontáneo por primera vez, se trata de la línea perteneciente al Xe IV:  $4558.80 \pm 0.05 \text{ \AA}$

La línea  $4647.40 \pm 0.04 \text{ \AA}$  reportada como una transición del C III en la tabla de miscelaneas de Bridges y Chester [32] es en realidad una línea del Xe IV medida por primera vez por nosotros y que tiene longitud de onda de  $4647.43 \pm 0.06 \text{ \AA}$

Similar es el caso de la línea  $4660.40 \pm 0.1 \text{ \AA}$  reportada por los mismos autores [31] en operación laser y que es atribuida al xenón, pero en nuestro espectro espontáneo las líneas más cercanas halladas son las  $4650.25 \pm 0.01$  y la  $4650.83 \pm 0.01 \text{ \AA}$  pertenecientes al Xe III ó Xe IV.

La línea laser reportada por Neusel [60] con longitud de onda  $4723.1 \pm 0.6 \text{ \AA}$  fué clasificada como la línea del Xe III :  $4723.57 \text{ \AA}$  . Esta clasificación resulta dudosa puesto que en nuestro espectro espontáneo aparece la línea perteneciente al Xe III  $4723.57 \pm 0.05 \text{ \AA}$  que es conocida y la nueva línea en espontáneo con longitud de onda  $4723.14 \pm 0.05 \text{ \AA}$  sin precisar de que ión.

La línea laser  $4748.92 \pm ?$  reportada por Bridges y Halstead [58] fué asignada como Xe III :  $4748.78 \text{ \AA}$  medida por Humphreys [36] , siendo la longitud de onda calculada  $4748.9 \text{ \AA}$  pero sucede que nosotros tenemos en nuestros espectros espontáneos una línea nueva del Xe III a  $4748.94 \pm 0.01 \text{ \AA}$  que está más cerca a la línea laser encontrada por estos autores.

La línea  $4954.2 \pm 0.15 \text{ \AA}$  supuesta del Xe II por Dahlquist [57], figuró en la tabla de miscelaneas y después como del Xe III en los trabajos de Bridges y Chester [31] [32] y luego insinuaron que podría ser del Xe IV en el trabajo de Bridges y Mercer [64] al obtenerla en operación continua. Fué obtenida también en nuestro laboratorio en forma pulsada y se la midió a  $4954.18 \pm 0.05 \text{ \AA}$  [50].

Ahora la hemos medido en tercer orden y la hemos encontrado por vez primera en espectros espontáneos e identificado como del Xe IV  $4954.13 \pm 0.01 \text{ \AA}$ , consistente con lo publicado por Papayouanou y Gumeiner quienes dicen que la línea  $4954 \text{ \AA}$  pertenece al Xe IV. [69] .

La línea  $5007.80 \pm 0.05 \text{ \AA}$  vista por nosotros como laser [50] fué reportada

previamente por Bridges y Chester [31] [32] en miscelaneas y supuesta como del Xe III posteriormente; Bridges y Mercer la supusieron del Xe IV luego de obtenerla en operación continua [64]; Dahlquist insistió en que sería del Xe II [57] pero Papayoanou y Gumeiner son terminantes con su experiencia al aseverar que la línea 5008 Å pertenece al Xe IV. En nuestro espontáneo tenemos  $5007.74 \pm 0.01$  Å perteneciente al Xe IV.

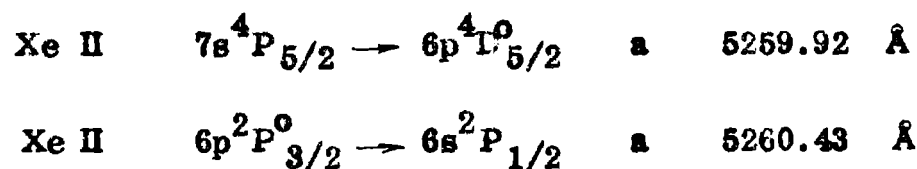
La línea  $5157.04 \pm 0.06$  Å medida por Hoffmann y Toschek [67] en emisión estimulada ha sido medida en nuestro espontáneo a  $5157.08 \pm 0.05$  Å, tratándose de una línea nueva del Xe IV.

La línea  $5159.08 \pm 0.05$  Å fue reportada por Bridges y co. [31] [32] y [64] y fue supuesta sucesivamente como perteneciente al Xe II, Xe III y como Xe IV al obtenerla en operación continua. Dahlquist [57] recalzó que debiera pensarse como del Xe II pero Papayoanou y Gumeiner [69] reportan como perteneciente al Xe IV una línea a 5159 Å. Nosotros obtuvimos emisión estimulada en  $5159.08 \pm 0.03$  Å siendo esta la mejor medida en laser. Ahora reportamos la espontánea medida en tercer orden de difracción y la ratificamos como perteneciente al Xe IV a la longitud de onda  $5159.02 \pm 0.01$  Å.

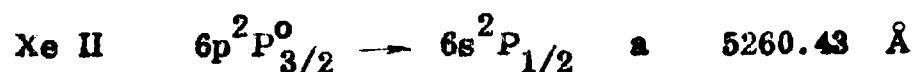
La línea  $5260.17 \pm 0.03$  Å y la línea  $5260.43 \pm 0.03$  Å halladas por primera vez juntas en espectros espontáneos en nuestros laboratorios, termina con una larga serie de confusiones cometidas por diversos autores: Dahlquist [57], Bridges y

y co. [31] [32] y [58]; Heard y Peterson [55]; Simmons y Witte [66] y por Hoffmann y Toschek [67]; quedó aclarado en el trabajo de Gallardo y as. [50]. Una reproducción positiva puede verse en la página siguiente. La línea  $5260.17 \pm 0.05 \text{ \AA}$  puede verse en emisión estimulada que corresponde a la espontánea de esa misma longitud de onda perteneciente al Xe IV al lado de la cual se ve la línea  $5260.43 \pm 0.05 \text{ \AA}$  clasificada como del Xe II que ya era conocida. Notese que hemos modificado el error estimado de nuestras medidas con respecto a nuestra primera medición.

Estas dos líneas fueron confundidas como si fueran una solo en el review paper de Bridges y Chester [32] y propusieron entonces dos clasificaciones alternativas:



éstas deben ser desechadas. En cambio proponemos para la línea conocida del Xe II la siguiente clasificación:



quedando pendiente la otra clasificación hasta que se complete la tabla de niveles del xenón tres veces ionizado.

Nada podemos precisar acerca de las líneas laser  $5340 \pm 1 \text{ \AA}$  medida por Simmons y Witte [66] y  $5343.34 \pm 0.05 \text{ \AA}$  medida por Hoffmann y Toschek [67] puesto que la única línea vista en esta zona es la  $5341.31 \pm 0.01 \text{ \AA}$  sin poder precisar a que ión pertenece.

Las líneas  $5352.90 \pm 0.05 \text{ \AA}$  y  $5394.60 \pm 0.05 \text{ \AA}$  fueron obtenidas en nuestro laboratorio en emisión estimulada [50]. Nuestra última determinación de las longitudes de onda en tercer orden de difracción en emisión espontánea nos permitió además de una medida más precisa el posterior análisis para asignar las mismas a la especie iónica a la que realmente pertenecen: dado que ya habían sido asignadas al Xe II, Xe III y Xe IV. En la tabla al final del Cap. II figuran esas asignaciones junto a las medidas de cada autor, así como los errores de medida

Nuestra nueva apreciación ha sido:

Xe IV	$5352.88 \pm 0.01 \text{ \AA}$
Xe IV	$5394.60 \pm 0.01 \text{ \AA}$

Dahlquist [57] midió una línea laser a  $5395.7 \pm 0.15 \text{ \AA}$  que no vimos en emisión espontánea junto a las otras nuevas reportadas. La más cercana al respecto fué la  $5395.25 \pm 0.06 \text{ \AA}$ . Recientemente Papayoanou y Gumelner [69] establecieron que las líneas  $5353 \text{ \AA}$  y  $5395 \text{ \AA}$  en operación laser pertenecían al Xe IV, pero esta aseveración resulta ambigua con respecto a la última línea de acuerdo a lo expuesto arriba, en virtud de que no especifican el error de sus medidas.

Las líneas  $5499.31 \pm 0.04 \text{ \AA}$  observada como laser por Hoffmann y Toschek [67] y  $5501 \pm 1 \text{ \AA}$  por Simmons y Witte [66] suponemos que se trata de la misma línea. Nosotros observamos en nuestro espontáneo solo una línea dentro del límite de los errores especificados, en  $5499.42 \pm 0.01 \text{ \AA}$  que no pudimos precisar a que ión pertenece.

No sucede lo mismo con las líneas  $5592.35 \pm 0.05 \text{ \AA}$  y  $5590 \pm 1 \text{ \AA}$  que fueron interpretadas como una sola línea por los mismos autores e identificadas como Xe II  $5591.61 \text{ \AA}$  en el trabajo de Hoffmann y Toschek [67]. Pero nosotros tenemos en nuestros espectrogramas junto a esa línea del Xe II  $5591.54 \pm 0.01 \text{ \AA}$  la línea nueva del Xe IV  $5592.27 \pm 0.01 \text{ \AA}$ .

La línea  $5659 \text{ \AA}$  dada en comunicación privada por Bell y Bloom a Bridges y Chester y que fué obtenida como laser por aquellos, quedará sin saberse cual es su espontánea por el momento ya que en nuestro espectro tenemos dos líneas del Xe II, la  $5659.33 \pm 0.01 \text{ \AA}$  clasificada y una nueva,  $5659.92 \pm 0.01 \text{ \AA}$

La línea  $5955.73 \pm 0.04 \text{ \AA}$  atribuida primero al oxígeno por Bridges y Chester [31] y luego al Xe II por ellos mismos [32], fué luego medida por Dahlquist [57] a  $5955.7 \pm 0.15 \text{ \AA}$  y nosotros la tuvimos también en operación laser en longitud de onda  $5955.67 \pm 0.05 \text{ \AA}$  y ahora la vemos como una nueva línea en espontáneo que se comporta como línea perteneciente al espectro del Xe IV.

La línea  $6176.2 \pm ?$  vista en emisión estimulada por Neusel [60] y obtenida en operación continua por Hodges y Tang [68] fué medida por nosotros en nuestro espectro espontáneo y la reconocemos como perteneciente al xenón dos veces ionizado, esto es Xe III  $6176.15 \pm 0.01 \text{ \AA}$

La línea espontánea más cercana encontrada a la reportada por Wheeler [70]



como laser a longitud de onda  $6343.18 \pm 0.30 \text{ \AA}$  fué la línea  $6343.43 \pm 0.05 \text{ \AA}$  sin precisar a que ión pertenece

La línea laser  $6699.50 \pm 0.30 \text{ \AA}$  reportada por Hoffmann y Toschek [67] no fué vista en nuestros espectros espontáneos.

La línea  $7148.94 \pm 0.6 \text{ \AA}$  reportada por Neusel [59] fué clasificada como del  $\text{Xe II}$   $7149.03 \text{ \AA}$ , esta es también la única línea en la vecindad que hemos encontrado y medimos a  $7149.03 \pm 0.05 \text{ \AA}$ , pero no entendemos como especificando el error en el primer decimal de su medida el autor da una segunda cifra

Por último la línea laser  $8569 \pm 3 \text{ \AA}$  vista por Sinclair [56] creemos que se trata de la transición  $8566.88 \pm 0.05 \text{ \AA}$  por ser (y por cierto muy casualmente) la única que queda comprendida dentro del error estimado. No podemos precisar a que ión pertenece.

La tabla siguiente resume las líneas laser discutidas, con nuestra mejor medida en su correspondiente espontánea. En aquellos casos en que los errores de medida no permitan decidir si la línea observada en emisión espontánea corresponde a la laser vista por otros autores, o en el caso de no haber aparecido en nuestras placas hemos puesto en otra columna la longitud de onda mas cercana siempre que esta medida no difiera en más de un Angstrom. Contiene también la información referente a que especie iónica pertenece cada línea espectral según nuestra investigación.

Se denota con el símbolo ? a aquellas líneas vistas en operación laser por otros autores y no vistas hasta el momento en espectros espontáneos del xenón y que por este motivo permanece la duda de si realmente pertenecen a este elemento

Laser reportada	Espectro espontáneo	Especie iónica	Espontánea + cercana	Obs.
2477.18 $\pm$ 0.06Å		?	2477.39 $\pm$ 0.05Å	nueva
2691.82 0.06	2691.84 $\pm$ 0.05Å	III		nueva
2983.7 0.5	2983.72 $\pm$ 0.05Å	IV		nueva
3079.78 0.06	3079.71 $\pm$ 0.01	III		nueva
3246.94 0.06	3246.97 0.01	IV		nueva
3305.92 0.06	3305.85 0.05	III		nueva
3306.4 0.5		IV	3306.06 $\pm$ 0.05Å	nueva
		III o IV	3506.49 0.01	nueva
		III	3306.81 0.01	conocida
3330.82 0.06		?		no observada
3350.04 0.06	3350.01 0.05	IV		nueva
3482.96 0.06		IV	3483.26 0.05	nueva
3645.46 0.06		IV	3645.57 0.01	nueva
3669.20 0.06	3669.20 0.01	?		nueva
3760.00 0.04	3759.91 0.05	IV		nueva

Laser reportada	Espectro espontáneo	Especie iónica	Espontánea + cercana	Obs.
3803.27+0.06Å	3803.21+0.05Å	IV		nueva
		IV	3803.02+0.05Å	nueva
3972.93 0.06	3973.00 0.01	IV		nueva
4305.75 0.03	4305.71 0.01	IV		nueva
		III	4305.84 0.01	conocida
4558.74 0.06	4558.80 0.05	IV		nueva
4647.40 0.04	4647.43 0.06	IV		nueva
4650.40 0.1		III o IV	4650.25 0.01	nueva
		III o IV	4650.83 0.01	nueva
4723.1 0.6		?	4723.14 0.05	nueva
		III	4723.57 0.05	conocida
4748.92	4748.94 0.01	III		nueva
4954.18 0.05	4954.13 0.01	IV		nueva
5007.80 0.05	5007.74 0.01	IV		nueva
5157.04 0.06	5157.08 0.05	IV		nueva
5159.08 0.05	5159.02 0.01	IV		nueva
5260.17 0.05	5260.17 0.05	IV		nueva
5260.43 0.05	5260.43 0.05	II		conocida
5341. 1.		?	5341.31 0.01	nueva

Laser reportada	Espectro espontáneo	Especie iónica	Espontánea + cercana	Obs.
5352.90 $\pm$ 0.05Å	5352.90 $\pm$ 0.01Å	IV		nueva
5394.60 0.05	5394.60 0.01	IV		nueva
5395.7 0.15		?	5395.25 $\pm$ 0.06 Å	nueva
5499.31 0.04		?	5499.42 0 01	nueva
5501. 1.		?	5499 42 0.01	nueva
5592.35 0.05		IV	5592.27 0.01	nueva
		II	5591.54 0.01	conocida
5590. 1.		IV	5592.27 0.01	nueva
		II	5591 54 0.01	conocida
5659.		II	5659.33 0.01	conocida
		?	5659 92 0.01	nueva
5955.67 0.05	5955.67 0.05	IV		nueva
6176.2	6176.15 0.01	III		nueva
6343.18 0 30	6343.48 0.05	?		nueva
6699.50 0.30		?		no observada
7148.94 0.6		II	7149.03 0.05	conocida
8569. 3.	8566.88 0.05	?		nueva

**"Al interpretar datos surgen conocimientos. La interpretación de datos se hace sobre la base de conceptos y suposiciones que cambian a medida que se incrementan nuestros conocimientos. El conocimiento cambia debido a que esos principios y conceptos cambian constantemente. Aunque el conocimiento cambia, este cambio tiene una buena razón de ser, ya que origina un conocimiento mas amplio y mejor de lo que se conocía anteriormente."**

**J. J. Schawab**

**CAPITULO V**  
**Conclusiones**

Si observamos las condiciones experimentales detalladas en el Capítulo II al resumir trabajos anteriores al presente, encontraremos una diversidad de presiones, capacitores, voltajes, etc. Pocos trabajos o ninguno hace referencia a la forma del pulso de corriente y de tensión obtenidas de sus fuentes de energía. A lo más se refieren a su longitud en tiempo y a sus valores de cresta.

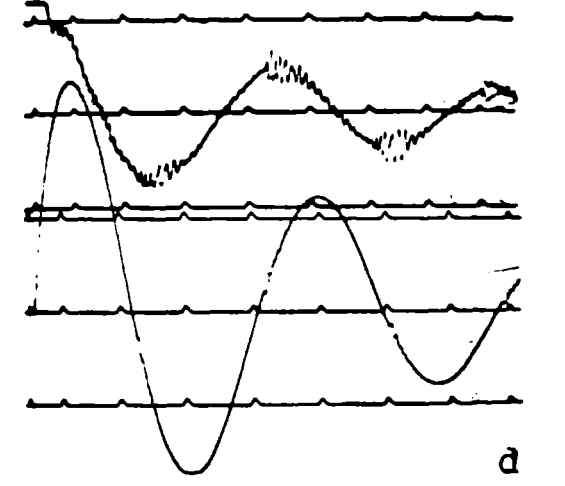
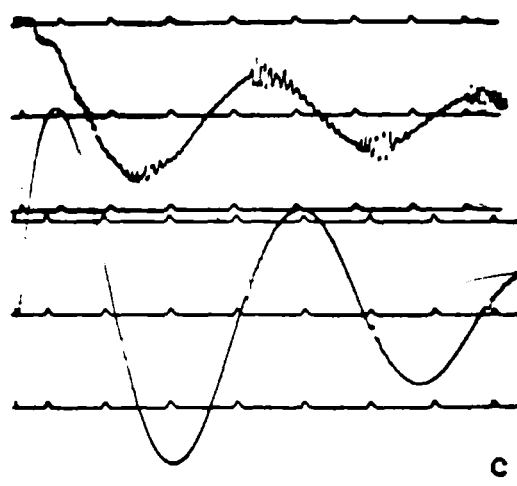
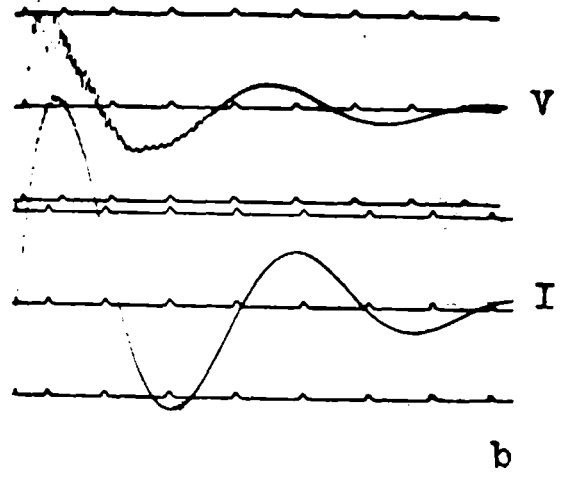
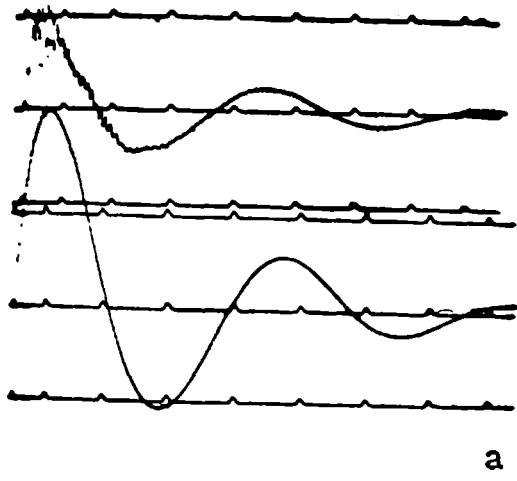
Muchos investigadores han trabajado con fuentes mucho más energéticas que las nuestras, sin embargo no han obtenido espectros tan ricos ni tan ionizados como los nuestros.

Tampoco hacen referencia a la inductancia de sus capacitores y de sus circuitos, siendo estos, factores decisivos en la forma final de los pulsos de excitación.

A nuestro parecer todo se comporta como si el rise-time de los pulsos de excitación estuvieran vinculados directamente con la obtención de los espectros ionizados. Nuestros pulsos arrojan medidas de tiempos mucho más cortos que los detallados por otros autores. Nuestros pulsos típicos sacados en diferentes condiciones de presión están fotografiados en la página siguiente.

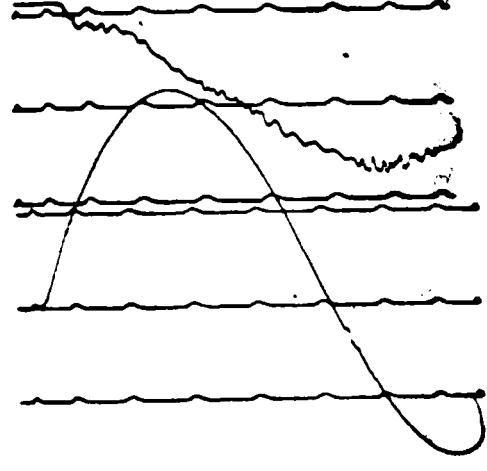
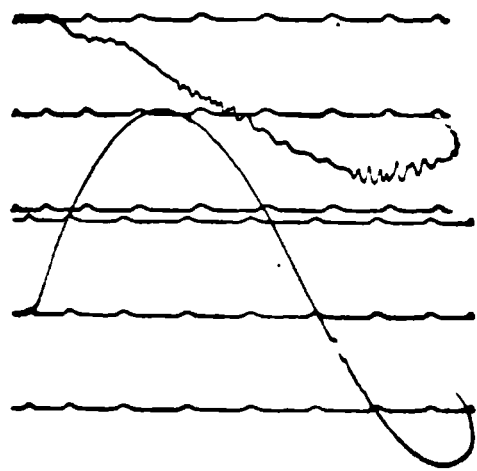
Las fotografías fueron tomadas con el banco de capacitores de 4 nF cargado con tensiones más altas de 30 kV. y presiones alrededor de 15 mtorr.

Paulatinamente en las figuras a, b, c y d se aumentó la alta tensión y se disminuyó la presión para favorecer la excitación. La figura d reproduce los pulsos de tensión y de corriente óptimos para la obtención del efecto laser y el es-



a'

b'



pectro del xenón espontáneo tres veces ionizado. La página siguiente reproduce las condiciones obtenidas en la mejor de las excitaciones. Un pulso de corriente de 500 A de pico con solo 25 - 30 ns de rise-time

Los pulsos de referencia por encima y debajo de las líneas cero de tensión y de corriente son barridos de referencia a  $\pm 200$  voltios.

Así para saber el pico de tensión (los superiores en cada figura) debe hacerse la siguiente operación:

$$V_m = V_o \cdot D \cdot k_v$$

donde:  $V_m$  = pico de tensión medido

$V_o$  = pico de tensión en pantalla del osciloscopio

$D$  = factor del divisor de tensión en nuestro caso  $\frac{6500 + 76}{76}$

$k_v$  = factor de amplificación en Y utilizado para el haz del osciloscopio destinado a la medida de tensión.

Para calcular la corriente medida, debe hacerse la siguiente operación:

$$I_m = \frac{V_o}{1} \cdot k_i = I_o \cdot k_i$$

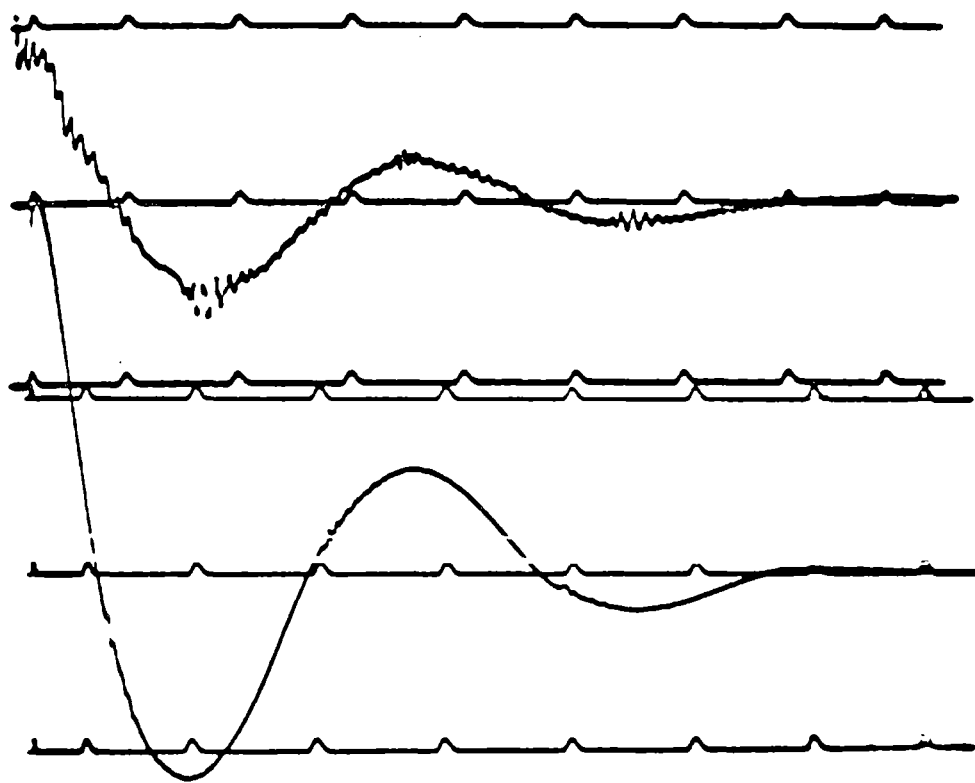
donde se ha indicado con:

$I_m$  = pico de corriente medida

$k_i$  = factor de amplificación utilizado en el haz del osciloscopio destinado a la medida de corriente

Los resultados obtenidos en las seis figuras de la página anterior serán





2,5μ  
1¼

2,5μ  
1¼

tabulados, indicándose con  $t$  el tiempo transcurrido entre las marcas del barrido horizontal.

Figura	Alta Tensión kV	$t$ ns	rise time ns	$V_o$	$k_v$	$V_m$	$I_o$	$k_1$	$I_m$
a	30	250	125	200	1.25	216	420	1.25	525
b	37	250	100	200	1.25	216	430	1.25	537
c	44	250	100	210	1.25	227	430	1.25	537
d	50	250	80	220	1.25	238	450	1.25	563
a'	30	100	100	205	1.25	221	420	1.25	525
b'	50	100	100	220	1.25	238	450	1.25	537

Los errores de medida de la presente tabla son menores que el 10%.

Estas medidas cuantitativas fué posible tomarlas mediante el material especial para pulsos Emile Haefely del Lab. de Alta Tensión de la Fac. de Ingeniería de la UNLP. Con estas medidas se confirma lo aseverado por Gallardo [74] en su tesis doctoral en forma cualitativa, de donde extractamos el siguiente párrafo: "Se observaron picos de alrededor de 500 A y cada descarga tenía de 4 a 6 oscilaciones de 600 ns de periodo. Como dato interesante, debe agregarse que el pulso de corriente mostró poca dependencia respecto de la presión del gas dentro del tubo"

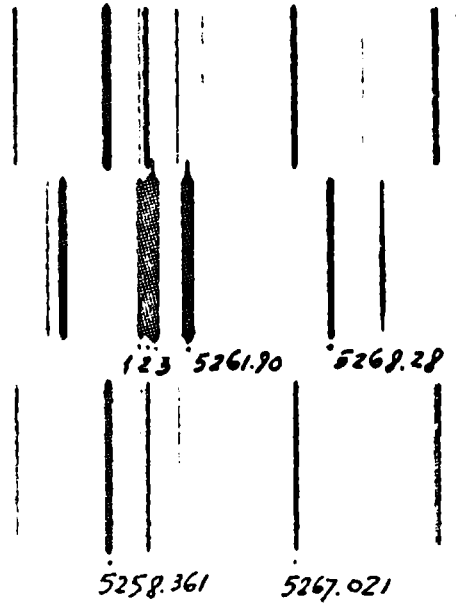
El panorama ha quedado mucho más claro desde el punto de vista espectroscópico, pero, para aquellos que solo se interesan en la medición de potencias será algo más complicado en lo sucesivo referirse a tal o cual línea espectral, por cuanto la resolución del sistema espectrógrafo-detector utilizado en muchos trabajos de laser no es suficiente para determinar una longitud de onda. Por lo menos en lo que al xenon se refiere cuyo espectro es muy denso. De más está decir, que en estas condiciones, resulta sumamente aventurado el intento de cualquier clasificación, como las señaladas en el capítulo IV. Las más de las veces estas líneas fueron asignadas a determinadas transiciones solo haciendo diferencias de niveles de energía conocidos de una especie iónica, aún no sabiendo si realmente pertenecían a ellas; cuando no, las reglas de selección fueron violadas varias veces.

El trabajo de medición del espectro del xenón y del reconocimiento de las distintas especies iónicas fué empezado en nuestro laboratorio a comienzos de 1969. El trabajo ha sido agotado en la región visible, pero no cabe duda que estas experiencias deben extenderse hacia regiones del ultravioleta de vacío y al infrarrojo hasta agotar toda la región fotográfica del espectro electromagnético. La obtención de estos datos permitiría mediante el uso del Principio de Combinación de Ritz una completa idea del esquema de niveles de energía autoconsistente con las líneas espectrales observadas

Para terminar, haremos mención de una última evidencia experimental.

Una forma especial fué vista en todas aquellas líneas que han sido observadas

1. 5259.80
2. 5260.17
3. 5260.43



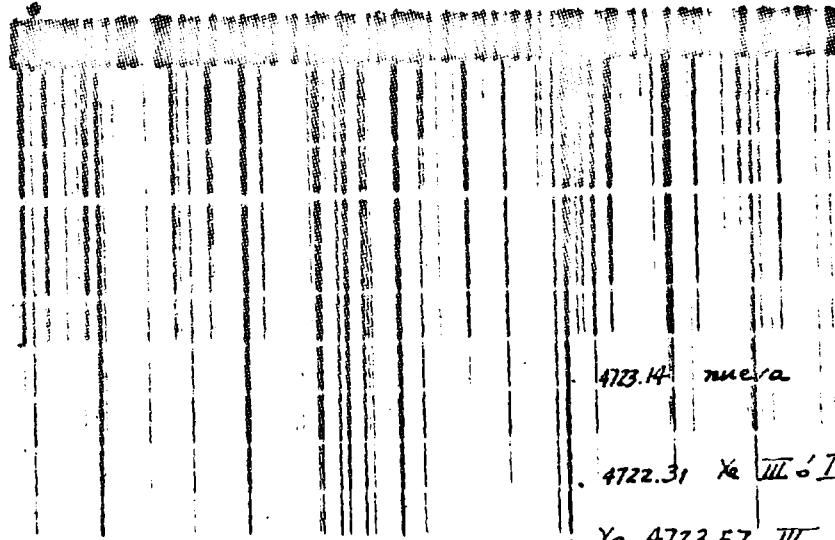
Th

Xe

Th

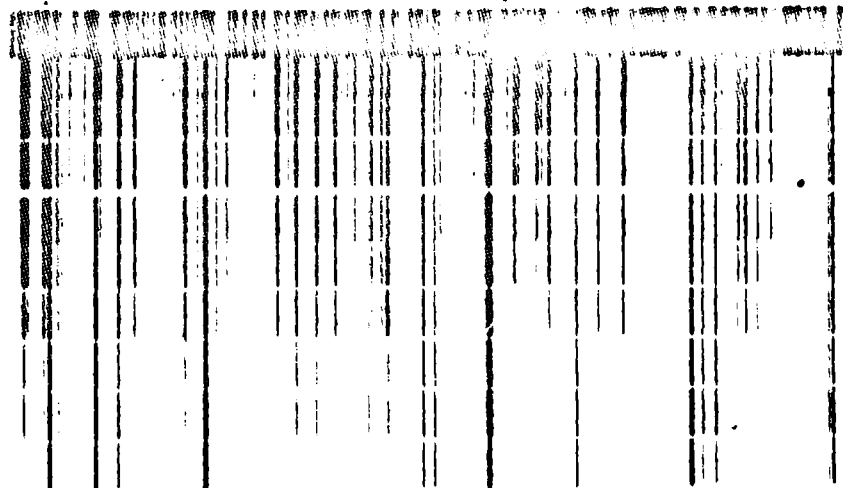
Th 4703.99

Th 4663.



Th 4374.124

Th 4328.909



Xe 4305.84 IV nueva

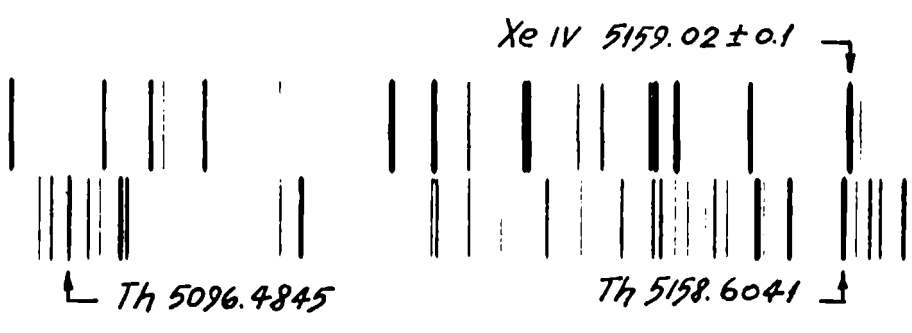
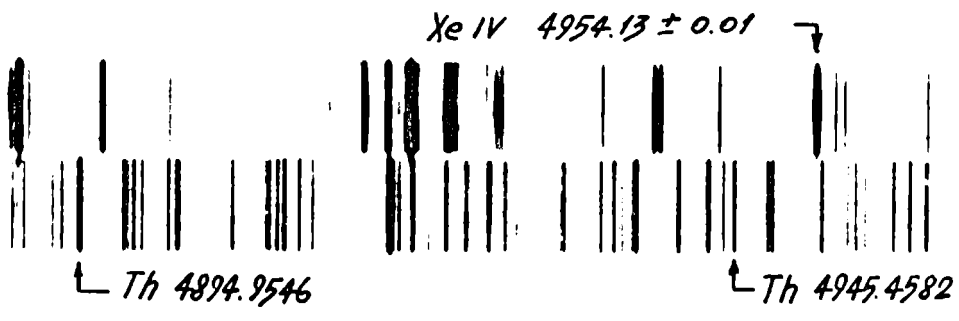
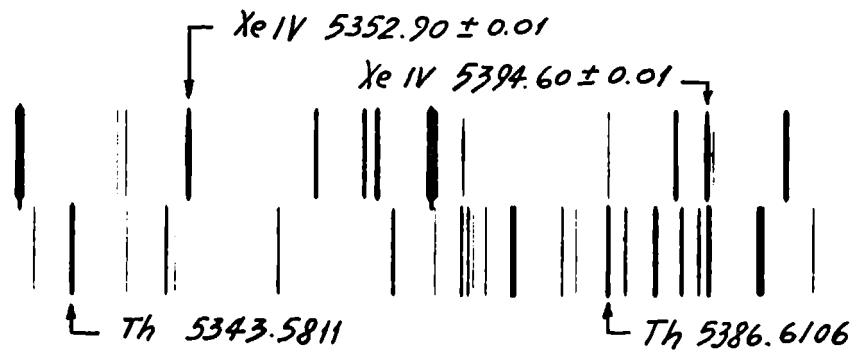
en emisión estimulada, cuando se fotografió en emisión espontánea sin sacar el espejo de atrás de la cavidad y aún muchas de estas líneas ( en forma de huso ) fueron vistas en el espontáneo con esta forma, quitando ambos espejos. Esto demostraría la alta ganancia de algunas líneas en la producción de luz coherente.

Esta forma particular puede verse en las líneas marcadas de la siguiente fotografía.

Mas curioso resulta aún que muchas otras líneas no vistas aún como laser adoptaron formas similares, lo que indicaría su predisposición a ser vistas en emisión estimulada ni bien se facilitara su amplificación, consiguiendo las condiciones experimentales adecuadas.



Lic. Eliseo Gallego Llesma



## REFERENCIAS

- 1 A. Einstein, Phys. Zeit. 18, 121 (1917)
- 2 N.G.Basov y A.M.Prokhorov, JEPT 27, 431, (1954)
- 3 N.G.Basov y A.M. Prokhorov, Proc.Acad.Sci. (URSS) 101, 47, (1955)
- 4 A. Fabrikant, JEPT 14, 375 (1962)
- 5 C.H. Townes, ver ref. 7
- 6 J. Weber, Phys. Rev. 108, 537 (1957) y Rev.Mod.Phys., 31, 681(1959)
- 7 J.P.Gordon,H.J. Zeiger y C.H.Townes, Phys. Rev. 99, 1264 (1955)
- 8 A.L.Schawlow y C.H.Townes, Phys.Rev. 112, 1940 (1958)
- 9 T.H.Maiman, Brit. Commun.Electron. 7, 674 (1960) y Nature 187, 493 (1960)
- 10 A. Javan, W.R.Bennett (jr) y D.R.Herriot, Phys.Rev.Lett. 6, 106, 1961
- 11 A.G. Fox y T. Li , Bell Syst. Tech.J.40, 453 (1961)
- 12 G.D.Boyd y J.P.Gordon, Bell Syst. Tech. J. 40, 489 (1961)
- 13 G.D.Boyd y H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J. 41, 1347 (1962)
- 14 A.D.White y J.D.Ridgen, Proc. IRE (Correspondence) 50, 1967 (1962)
- 15 L.E.S. Mathias y J.T. Parker, Phys. Lett. 7, 194 (1963)
- 16 W.E. Bell, Appl.Phys.Lett. 4, 34 (1964)
- 17 W.B.Bridges, Appl.Phys.Lett. 4, 128 (1964)
- 18 G. Convert, M. Armand y P. Martinot-Lagarde, Comptes Rendus 258, 4467 (1964)
- 19 W.R.Bennett (jr), P.W.Knutson (jr), G.N.Mercer y J.L.Detch, Appl. Phys. Lett. 4, 180 (1964)

- 20 E.I.Gordon, E. F. Labuda y W.B. Bridges, *Appl. Phys. Lett.* 4, 178, (1964)
- 21 Arnold L. Bloom, "Gas Lasers", Wiley, New York, 1968.
- 22 W.B. Bridges, W.R. Bennett (jr) y G. Convert,
- 23 W.B. Bridges, *Proc. of the IEEE (C)* 52, 843 (1964)
- 24 H.J. Gerritsen y P.V. Goedertier, *J. Appl. Phys.* 35, 3060, (1964)
- 25 K. Bockasten, M. Garavaglia, B.A. Lengyel y T.J. Lundholm, *JOpt. Soc. Am.*  
55, 1051 (1965)
- 26 A.L. Bloom, W.E. Bell y F.O. Lopez, *Phys. Rev.* 135, 578A (1964)
- 27 R.A. Mc. Farlain, *Appl. Phys. Lett.*, 5, 91, (1964)
- 28 G.R. Fowles y R.C. Jensen *Proc. IEEE (Correspondence)* 52, 851, (1964)  
y *Appl. Optics* 3, 1191 (1964)
- 29 R.A. Mc. Farlain, *Appl. Optics* 3, 1196 (1964)
- 30 P. Laures, L. Danas y C. Frapard, *Comptes Rendus* 258, 6363 (1964) y  
*Comptes Rendus* 259, 745 (1964)
- 31W W.B. Bridges y A.N. Chester, *Appl. Opt.* 4, 573, (1965)
- 32 W.B. Bridges y A.N. Cheter, *IEEE J. of Quant. Elec.* QE-1, 66 (1965)
- 33 P.K. Cheo y H.G. Cooper, *J. Appl. Phys.* 36, 1862 (1965) y  
*Bull. Amer. Phys. Soc.* 9, 626 (1964)
- 34 W.R. Bennett y co. ver ref. 19
- 35 E.I. Gordon, E. F. Labuda, R.C. Miller y C.E. Webb, *Excitation mechanisms of the argon-ion laser*, *Physics of Quantum Electronics*, Mc.Graw-Hill, New York, 1966.
- 36 C.J. Humphreys, de la Purdue University, Department of Physics, Lafayette Indiana, USA, quien fué muy gentil en suministrarnos una copia de su material no publicado sobre los espectros del Xe realizados en el National Bureau of Standards en 1935.



- 37 C.J.Humphreys, W.F.Meggers y T.L. de Bruin, *J.Res.Nat. Bur. Stand.* 23, 683 (1939)
- 38 C.J.Humphreys, *J.Res.Nat. Bur. Stand.* 16, 639 (1936)
- 39 C.J.Humphreys, *J.Res.Nat. Bur. Stand.* 22, 19 (1939)
- 40 C.J.Humphreys y E. Paul (jr), *J.Opt.Soc.Am.*
- 41 Bela A. Lengyel, "Introduction to Laser Physics" Wiley, New York, 1966.  
y "Lasers, Second Edition" Wiley, New York, 1971.
- 42 A.Papayoanou e I. Gumeiner, *Appl. Phys. Lett.* 16, 5 (1970)
- 43 Gordon y co. ver ref. 35
- 44 Carlotta Moore-Sitterly "Atomic Energy Levels", *Nat. Bur. Stand. circular 467*, vol.3, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C. 1949 - 1958.
- 45 T.J.Bridges y W.W.Rigrod, *IEEE J.Quant.Electr.* QE-1, 303 (1965)
- 46 L.D.Pleaseance y E.V.George, *Appl. Phys. Lett.* 18, 12, 557 (1971)
- 47 A.Papayoanou e I.Gumeiner, *J. Appl. Phys.* 42, 5, 1014 (1971)
- 48 K.S.Mustafin, V.I.Protasevich y V.N.Rzherskii, *Opt. & Spect.* 3, 224 (1971)
- 49 P.W.B. Pearse y A.G.Gaydon, "The identification of molecular spectra" Chapman & Hall Ltd., London, 1941.
- 50 M. Gallardo, M. Garavaglia, A.A. Tagliaferri y E. Gallego Lluésma, *IEEE J.Quant.Electr.* QE-6, 11, 745 (1970)
- 51 F.P.J.Valero, *J. Opt.Soc.Am.* 58, 484 (1968)
- 52 F.P.J.Valero, *J. Opt.Soc.Am.* 58, 1048 (1968)
- 53 D.Goorvitch, F.P.J.Valero y A.Clúa, *J.Opt.Soc.Am.* 59, 971 (1969)
- 54 L.Dana, P. Laures y R.Rocherolles, *C.R.Acad.Sci.(Paris)* 260, 481 (1965)
- 55 H.G.Heard y J. Peterson, *Proc.IEEE(Correspondence)* 52, 1050 (1964)

- 56 D.C.Sinclair, *J. Opt. Soc. Am.* 55, 571 (1965)
- 57 J.A.Dahlquist, *Appl. Phys. Lett.*, 6, 193 (1965)
- 58 W.B.Bridges y H.Halstead, *IEEE J. Quant. Electr. (Notes and Lines)* QE-2, 84 (1966)
- 59 R.H.Neusel, *IEEE J. Quant. Electr. (Notes and Lines)* QE-2, 334 (1966)
- 60 R.H.Neusel, *IEEE J. Quant. Electr. (Notes and Lines)* QE-2, 758 (1966)
- 61 K.G.Ericson y L.R. Lidholt, *J. Quant. Electr. (Correspondence)* QE-3, 94 (1967)
- 62 W.B.Bridges, A.S.Halstead y G.N.Mercer "High Power UV Ion Laser" presentado al 1968 International Electron Devices Meeting, Washington, D.C. octubre de 1968.
- 63 S.M.Jarret y G.C.Barker, *IEEE J. Quant. Electr. (Notes and Lines)* QE-5, 166 (1969)
- 64 W.B.Bridges y G.N.Mercer, *IEEE J. Quantum Electr. (Correspondence)* QE-5, 476 (1969)
- 65 A.Papayouanou e I. Gumeiner, ver ref. 42
- 66 W.W.Simmons y R.S.Witte, *J. Quant. Electr.* QE-6, 467 (1970)
- 67 V.Hoffmann y P.Toschek., *J. Quant. Electr.* QE-6, 757 (1970)
- 68 D.T.Hodges y C.L.Tang, *J. Quant. Electr.* QE-6, 757 (1970)
- 69 A.Papayouanou e I. Gumeiner, ver ref. 47
- 70 John P. Wheeler, *J. Quant. Electr.* QE-7, 429 (1971)
- 71 W.B.Bridges y A.N.Chester. *J. Quant. Electr.* QE-7, (1971)
- 72 A.R.Striganov y N.S.Sventiskii "Tables de longitudes de onda correspondientes a transiciones atómicas" Atomiskat, Moscú, 1966.
- 73 A.N.Zaidel, V.K.Prokof'ev y S.M.Raiskii, *Spektraltabellenn*, Veb Verlag Technik, Berlin, 1961.

74 Gallardo, Mario O. Tesis doctoral, Fac. Ciencias Fisicomatemáticas  
Universidad Nacional de La Plata.

En la redacción del Capítulo I se siguieron conceptos vertidos en los siguientes libros:

- \* "Gas Lasers", Arnold Bloom, Wiley, New York, 1968.
- \* "Lasers, Second Edition" , Bela A. Lengyel, Wiley, New York, 1971
- \* "Optique" Bruhat y Kastler, Dunod, Paris, 1968.
- \* "Scientific Foundations of vacuum Technique, 2nd. Edition" S. Dushman, J.M. Lafferty Editor, Wiley, New York, 1962.
- \* "Tesis doctoral del Lic. Mario J. Garavaglia" Fac. Ciencias Fisicomatemáticas, Universidad Nacional de La Plata,

Las citas del encabezamiento de cada capítulo pertenecen a:

Cap I: Arthur Schawlow, "Lasers and Light", Editado por Scientific American, W.H. Freeman & co., San Francisco, 1969.

Cap. II: "Un rayo de sol" Conferencia dictada por el Dr. Enrique Herrero Ducloux en el Colegio Nacional de Buenos Aires el 20 de junio de 1903.

Cap. III: "La Filosofía de la Ciencia Física" Sir. Arthur S. Eddington, Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1944-

Cap. IV: "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" de Galileo Galilei. Trad. J. San Román Villasante, anot. Teófilo Isnardi Editorial Losada, Buenos Aires, 1945.

Cap. V: "Acerca de la enseñanza de las ciencias" por Alberto E. J. Pesquet, en la revista de orientación didáctica LIMEN , X, 34, marzo 1972.

Dejo aquí constancia de mi inmensa gratitud hacia los Dres. Mario J. Caravaglia y Mario O. Gallardo, maestros y amigos inagotables y sinceros, por el diario aporte a mi formación.

Al Lic. Angel Alberto Tagliaferri por su cooperación y ayuda inestimable.

Al Dr. Carlos A. Massone por su tenaz y disciplinado impulso en momentos de decaimiento.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas que me becó durante dos años y otorgó subsidios para la realización de este trabajo

Al personal técnico y profesional del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata, que directa o indirectamente me ayudaron.

Eliseo Gallego Lluerna  
La Plata, 1972

**El material suministrado en esta tesis ha dado lugar a las siguientes publicaciones:**

- a) "About Unidentified Xenon Laser Lines"**  
M. Gallardo, M. Garavaglia, A.A. Tagliaferri y E Gallego Lluesma  
**Journal of Quantum Electronics, QE-6 , 11, 745 , nov. de 1970**
  
- b) "Pulsed Gas Laser Tube as Spontaneous Light Source"**  
E. Gallego Lluesma, A. A. Tagliaferri, M. Gallardo y M. Garavaglia  
**a ser publicado Journal of Physics E**
  
- c) "Laser Lines from Xenon triply ionized"**  
E. Gallego Lluesma, A. A. Tagliaferri, M. Garavaglia y M. Gallardo  
**en redacción**



## Notes and Lines

### Comments on the Identification of Some Xenon Ion Laser Lines

**Abstract**—Earlier measurements and level assignments made by the authors for some xenon ion laser lines are reevaluated in light of recent work by Gallardo and coworkers. The lines affected are the 5260.17-, 5260.43-, 4305.75-, and 3759.94-Å lines in xenon and 4647.40- and 4650.22-Å lines attributed to carbon.

A recent paper by Gallardo *et al.* [1] prompted us to review our early measurements of xenon ion laser wavelengths in the hope that we could further clarify the origin and characteristics of some of these xenon laser lines.

#### The 5260 line

In the original publication [2] we reported the measured wavelength as  $5260.17 \pm 0.06$  Å and the assignment as Xe II (?). In a subsequent review paper [3] the assignment was changed to

$$5259.92 \text{ Xe II } 7s^4P_{3/2} \rightarrow 6p^4D_{5/2}^0$$

and

$$5260.43 \text{ Xe II } 6p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 6s^2P_{1/2}$$

because the original line on the plate appeared broad enough to be a blend of two lines on one exposure and these were the

nearest two lines with an average roughly equal to our measurement. More recently we have observed a 5260 line operating CW in a very persistent fashion under conditions favorable to a set of lines tentatively identified as Xe IV [4]. The latter fact was not too striking in itself since CW operation on the Xe II 5260.43 Å had already been observed [5], but this, taken with the Gallardo *et al.* results, prompted a very careful reexamination of our 1964 spectroscopic plates. We found that, indeed, two different lines were lasing, but only under different discharge conditions. The individual lines were measured as  $5260.18 \pm 0.03$  Å and  $5260.44 \pm 0.03$  Å, with the 5260.18 line occurring only at high currents and in conjunction with the 5352.88, 5159.06, etc. lines attributed to Xe IV. The 5260.44 line occurred only at lower currents, in conjunction with Xe II and Xe III lines. It is clear that in the 5260 region there are two laser lines, both capable of pulsed or CW operation but under different discharge conditions

$$5260.17 \quad \text{Xe IV?}$$

$$5260.43 \quad \text{Xe II } 6p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 6s^2P_{1/2}$$

#### The 4306 line

Gallardo *et al.* [1] have measured the wavelength of this line as  $4305.75 \pm 0.03$  Å outside the possible range that would allow the assignments given by us in [2] and [3], 4305.85 Xe III ( $^2D^0$ )  $6p^3D_3 \rightarrow (^2D^0) 5d^3D^0_3$ . Our own measurement of  $4305.77 \pm 0.06$  Å also fell outside this range, but the assignment seemed reasonable given the other laser transitions that shared these levels (Xe III 4214.01, 4272.59, 4285.88). How-

ever, we have reexamined this line on our original plates and find that it did not occur under the discharge conditions that produced the Xe III lines, but instead, it occurred under higher current conditions which quenched the Xe III lines. The 4305.77 line occurs on the same plate and under the same conditions as the tentative Xe IV lines [4] and the  $3760.00 \pm 0.04$  Å line listed in [2] and [3] under miscellaneous rather than xenon and recently observed by Galardo *et al.* [1] in spontaneous emission as  $3759.94 \pm 0.03$ . We conclude that these two lines are both unclassified xenon lines that belong to higher spectra than Xe III.

#### The CIII lines

Gallardo *et al.* [1] report spontaneous emission lines at 4647.40 and 4650.22 Å in their xenon discharge. These are lines that were attributed to the third spectrum of carbon in [2] and [3] and also by McFarlane [6]. It is not clear whether the discharge of [1] could have unintentionally contained carbon from pump oil or other sources. However, the cathode used in the tube described in [2] and the CO<sub>2</sub> used for the discharge in [6] certainly could have provided sufficient carbon for laser oscillation. Since these two lines are the strongest spontaneous lines in the third spectrum of carbon [7], we still conclude that the laser lines observed in [2] and [6] are most likely the C III lines.

Comments made by Gallardo *et al.* [1] on other lines are consistent with our reevaluation of old spectrographic plates and other publications of which we are aware. A complete listing of ion laser lines to replace [3] has recently been prepared for publication [8], and will contain these corrections.

W. B. BRIDGES  
A. W. CHESTER  
Hughes Res. Lab.  
3011 Malibu Canyon Road  
Malibu, Calif. 90265

#### REFERENCES

- [1] M. Gallardo, M. Garavaglia, A. A. Tagliaferri, and E. G. Lluesma, "About unidentified ionized Xe laser lines," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-6, Nov. 1970, pp. 745-747.
- [2] W. B. Bridges and A. N. Chester, "Visible and UV laser oscillation at 116 wavelengths in ionized neon, argon, krypton, xenon, oxygen, and other gases," *Appl. Opt.*, vol. 4, May 1965, pp. 573-580.
- [3] —, "Spectroscopy of ion lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-1, May 1965, pp. 66-84.
- [4] W. B. Bridges and G. N. Mercer, "CW operation of high ionization states in a xenon laser," *IEEE J. Quantum Electron.* (Corresp.), vol. QE-5, Sept. 1969, pp. 476-477.
- [5] W. B. Bridges and A. S. Halsted, "New CW laser transitions in argon, krypton and xenon," *IEEE J. Quantum Electron.* (Notes and Lines), vol. QE-2, Apr. 1966, p. 84.
- [6] R. A. McFarlane, "Laser oscillation on visible and ultraviolet transitions of singly and multiply ionized oxygen, carbon and nitrogen," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 5, Sept. 1964, pp. 91-93.
- [7] A. R. Striganov and N. S. Sventitskii, *Tables of Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms*. New York: Plenum, 1968.
- [8] *Handbook of Lasers*. Cleveland, Ohio: Chemical Rubber Co., to be published.

