



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Generación y Detección de Iones Empleando  
el Cañón de Iones Modelo G-1

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
FÍSICO

PRESENTA:  
BENÍTEZ JASSO ISRAEL DE JESÚS

DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. BEATRIZ ELIZABETH FUENTES MADARIAGA



2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno  
Benítez  
Jasso  
Israel de Jesús  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
401109225
2. Datos del tutor  
Dra.  
Beatriz Elizabeth  
Fuentes  
Madariaga
3. Datos del sinodal 1  
Dr.  
Ramiro  
García  
García
4. Datos del sinodal 2  
Dr.  
José Ignacio  
Jiménez  
Mier y Terán
5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
Horacio  
Martínez  
Valencia
6. Datos del sinodal 4  
Dr.  
Luis  
Rodríguez  
Fernández
7. Datos del trabajo escrito  
Generación y detección de iones empleando el cañón de iones modelo G-1  
53 p  
2010

## Agradecimientos

A Mi Madre:

Gracias por todo el esfuerzo que hiciste durante tantos años para poder darme lo mejor cada día y seguir adelante hasta este momento, y enseñarme todos esos valores que me llevaron hasta donde estoy ahora y que no me hicieron alejarme del camino en el que siempre me pusiste, con lo cual te puedo decir lo lograste, te agradezco mucho por todo y te quiero mucho esta es la mejor forma de agradecerte todo.

A Mis Abuelos:

Gracias por darme su cariño y amor desde chico y formar una familia de valores, donde todos hemos sabido tomar un buen camino. Los quiero mucho.

A Mis Tíos:

Les agradezco por sus enseñanzas y ejemplos a seguir, por todo lo que me han dado y por la ayuda que le han dado a mi madre para que yo llegara hasta aquí, realmente gracias por todo.

A Mis Amigos:

Gracias por toda su compañía y ayuda durante esta dura etapa de mi vida, por brindarme su amistad y todo su apoyo en los momentos más críticos de la etapa. A mi amigo Benjamín Alarcón por sus consejos y toda la ayuda que me dio. A Pedro Corona por sus explicaciones y atenciones.

A Mis Sinodales:

Gracias por colaborar con su tiempo para las revisiones de este trabajo. A la Dra. Beatriz Fuentes, gracias por darme la oportunidad de haber hecho un trabajo desde cero, que para un estudiante de física es de vital importancia saber construir un aparato experimental.

Agradecimiento A Los Proyectos de la DGAPA:

PAPIME EN-101104  
PAPIIT IN-116909

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| PRESENTACIÓN   | 6  |
| INTRODUCCIÓN   | 7  |
| CAPÍTULO 1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE PLASMAS             | 8  |
| 1.1 DESCARGA DE UN GAS                               | 8  |
| 1.1.1 PROCESOS DE EMISIÓN ELECTRÓNICA                | 8  |
| 1.1.2 PROCESOS DE DESCARGA DE UN GAS                 | 10 |
| 1.2 PLASMAS  | 12 |
| 1.2.1 CONDICIONES PARA LA EXISTENCIA DE UN PLASMA    | 13 |
| 1.2.2 OCURRENCIA DE UN PLASMA                        | 15 |
| 1.2.3 IONIZACIÓN                                     | 16 |
| CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL      | 18 |
| 2.1 CAÑÓN DE IONES                                   | 18 |
| 2.1.1 FUENTE DE IONES                                | 19 |
| 2.1.2 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO                        | 22 |
| 2.1.3 SISTEMA DE GASES                               | 23 |
| 2.1.4 SISTEMA DE ACELERACIÓN Y ENFOQUE               | 25 |
| 2.1.5 PLACAS DE DEFLEXIÓN VERTICAL                   | 26 |
| 2.1.6 FILTRO DE VELOCIDADES                          | 27 |
| 2.2 LÍNEA DEL ACELERADOR                             | 29 |
| 2.2.1 CODO DE 10°                                    | 29 |
| 2.2.2 VÁLVULA, DETECTOR Y BANDERA                    | 29 |
| 2.2.3 OSCILOSCOPIO                                   | 30 |
| 2.3 SISTEMA DE VACÍO                                 | 31 |
| 2.3.1 BOMBAS MECÁNICAS                               | 33 |
| 2.3.2 BOMBA TURBOMOLECULAR                           | 34 |
| 2.3.3 MEDIDORES DE VACÍO                             | 36 |
| CAPÍTULO 3 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO               | 40 |
| 3.1 FUNCIONAMIENTO DEL CAÑÓN DE IONES                | 40 |
| 3.2 OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBA      | 42 |
| 3.3 CÁLCULO DE LAS MASAS DE LAS PARTÍCULAS OBTENIDAS | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4 ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES                             | 48 |
| CAPÍTULO 4 TRABAJOS A FUTURO DEL ACELERADOR Y CONCLUSIONES | 50 |
| 4.1 TRABAJOS A FUTURO                                      | 50 |
| 4.2 CONCLUSIONES   | 50 |
| 3.5 ANEXO 1 CÁLCULO DE LAS INCERTIDUMBRES                  | 51 |
| BIBLIOGRAFÍA   | 53 |

## **PRESENTACIÓN**

En el presente trabajo de tesis se describe la construcción de un acelerador de partículas de baja energía construido el Taller de Colisiones del Edificio Tlahuizcalpan en la Facultad de Ciencias de la U.N.A.M. El acelerador de partículas será empleado para producir haces de iones positivos con energías entre 1 y 10 keV; en él, se desarrollarán experimentos de colisiones atómicas y moleculares. El trabajo termina con la presentación de los primeros datos experimentales obtenidos. Se reportan las corrientes eléctricas generadas por iones de hidrógeno.

Este trabajo se inició con la colocación del cañón de iones y la cámara de reacción en las mesas puestas para tal fin. Se adecuaron para instalar los sistemas de vacío debajo de cada uno de los equipos. Se continuó con el armado y la construcción de piezas, las cuales se fueron colocando arduamente.

Después de instalar el sistema de vacío y las conexiones de la línea del acelerador se hicieron las instalaciones eléctricas de cada equipo con su respectiva fuente de poder. Se tuvieron que hacer los correspondientes cables.

Los temas en general que son necesarios para entender el funcionamiento del cañón de iones (fundamentos físicos), son descritos en el capítulo 1. Este capítulo tiene por nombre “Principios básicos de plasmas” e incluye: Descarga de un gas, Plasmas y Ionización. En el capítulo 2, se presentan y describen los componentes del dispositivo experimental. Mientras que en el capítulo 3, se especifica el desarrollo para la realización del experimento. Este capítulo contiene todo el proceso que se llevó a cabo, para obtener las corrientes de los iones generados, también contiene los datos y el análisis de los mismos. Finalmente en el capítulo 4, se presentan las conclusiones y trabajos a futuro planeados para el acelerador.

## INTRODUCCIÓN

Los aceleradores de partículas son instrumentos que utilizan campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas eléctricamente hasta alcanzar velocidades (y por tanto energías) muy altas del orden de Mev. Además, estos instrumentos son capaces de contener estas partículas. Un acelerador puede ser, desde un tubo de rayos catódicos ordinario, hasta grandes instrumentos que permiten explorar el mundo de lo pequeño, en búsqueda de los elementos fundamentales de la materia.

En general, existen dos tipos básicos de aceleradores: por un lado los lineales y por otro los circulares. En el trabajo de tesis, se describe uno de los tipos más comunes de aceleradores de partículas, un acelerador lineal de baja energía con intervalo de 0 a 10 Kev.

En general, los aceleradores de partículas no son aparatos exclusivos de laboratorios sofisticados, sino que también se encuentran muy presentes en la vida cotidiana de las personas, en forma de aceleradores de bajas energías. Ejemplos muy sencillos de estos aceleradores (de electrones principalmente), son los televisores o monitores de las computadoras (los modelos antiguos que utilizaban un tubo de rayos catódicos, los cuales pueden considerarse aceleradores lineales de una sola etapa) o los aparatos de rayos X que pueden encontrarse en las clínicas dentales o en los hospitales.

Estos aceleradores de bajas energías utilizan un único par de electrodos a los que se les aplica directamente una diferencia de potencial, de algunos miles de volts. En un aparato de rayos X se calienta un filamento metálico que se encuentra entre ambos electrodos mediante el paso de una corriente eléctrica, emitiendo de este modo electrones. Esos electrones son acelerados en el campo eléctrico generado entre ambos electrodos hasta alcanzar el electrodo que se utiliza como productor de rayos X, fabricado con un metal de un alto valor de su número atómico (por ejemplo el tungsteno  $Z = 74$ ).

# CAPÍTULO 1

## PRINCIPIOS BÁSICOS DE PLASMAS

La parte principal de nuestro acelerador de partículas es el cañón de iones; es aquí donde se genera el haz de acuerdo al gas que se admita. En la fuente de iones ocurren muchos de los fenómenos de la física. En este capítulo se describe la teoría de algunos de los fenómenos que ocurren en la fuente de iones dentro del cañón del acelerador.

### 1.1 Descarga de un gas

Dentro del cañón está la fuente generadora de los iones, esta fuente está hecha de un material cerámico especial (nitrito de boro), el cual tiene propiedades eléctricas y térmicas que no interfieren en el proceso de ionización, esto quiere decir que el material soporta la temperatura dentro del cañón (sin que el material se funda) y que no interfiere eléctricamente con el filamento, el ánodo y tampoco con las partículas producidas por la fuente (iones). También este material no interfiere con el vacío que se hace dentro del cañón para generar los iones, ya que el material no desgasifica con un alto vacío ( $10^{-7}$  torr). En la fuente se produce la ionización del gas que es introducido para generar el haz; aquí se generan varios fenómenos físicos antes de que el gas se ionice.

#### 1.1.1 Procesos de emisión electrónica<sup>[1]</sup>

La descarga eléctrica de un gas es un fenómeno el cual es observado cuando un gas o vapor se hace eléctricamente conductible. Bajo estas condiciones las cargas eléctricas libres se presentan y pueden moverse a través del gas, usualmente bajo la influencia de un campo eléctrico; el gas se dice estar ionizado.

Para utilizar las propiedades eléctricas de los gases en algunas aplicaciones se puede conectar un volumen de gas, contenido en una envoltura apropiada, a un aparato externo por medio de contactos eléctricos denominados electrodos. La función de los electrodos se entiende mejor tomándolos como fuentes y sumideros de portadores de carga, insertos especialmente en un gas para mantener y controlar las condiciones eléctricas deseadas. Los portadores de carga que se originan en los electrodos son casi exclusivamente electrones los cuales son liberados por el mecanismo de emisión electrónica: emisión termoiónica, emisión secundaria, emisión de campo, emisión fotoeléctrica. A continuación se explicarán brevemente estos mecanismos.

##### a) Emisión termoiónica<sup>[1]</sup>

Cuando un metal se calienta a una temperatura suficientemente alta, la “cola” de la distribución de Fermi-Dirac a la altura de la función de trabajo  $e_{\phi}$  por encima del nivel de Fermi, toma un valor porcentual importante y hay un número apreciable de electrones que pueden escapar del metal. Los electrones emitidos de esta forma pueden ser atraídos por un electrodo positivo colocado en las proximidades, dando lugar a una *corriente termoiónica*. Al electrodo positivo se le denomina ánodo, mientras que la superficie emisora es llamada cátodo. Juntos forman un diodo de vacío, mostrado esquemáticamente en la figura 1.1

El número de electrones disponibles para la emisión termoiónica es proporcional a  $e^{-e\phi/kT}$ . Se puede, pues, esperar que la propia corriente termoiónica sea también proporcional a este factor térmico. La densidad de corriente viene dada, por la expresión

$$J = AT^2 e^{-e\phi/kT} \quad \dots (1)$$

donde A es una constante universal del orden de 100 amperes/cm<sup>2</sup> grado<sup>2</sup>, pero que en condiciones experimentales reales varía extensamente de un material catódico a otro. Se puede comprobar por sustitución directa que la temperatura debe ser elevada a valores muy altos ( $\approx 2000$  °C) para que la corriente termoiónica se haga apreciable en metales que tengan valores típicos de la función de trabajo, es decir, de 4 a 5 eV. Por lo tanto, solo pueden ser utilizados como cátodos aquellos metales que tengan un punto de fusión alto (mayor de 2500 °C), siendo el más común el tungsteno con punto de fusión de 3410°C.

#### b) Emisión secundaria<sup>[1]</sup>

Se puede provocar la emisión de electrones por los metales por impacto de electrones primarios o de otras partículas, como por ejemplo, iones gaseosos. Los mecanismos físicos precisos por los que se comunica la energía cinética de las partículas incidentes a los electrones metálicos y les permite escapar, no están totalmente determinados. Hay, sin embargo, una suma de conocimiento empírico que hace posible predecir en qué condiciones esta *emisión secundaria* será fuerte o débil. Para cuantificar los datos experimentales es costumbre utilizar el *coeficiente de emisión secundaria* que se define como sigue:

$$\gamma = \frac{\text{Número de electrones emitidos}}{\text{Número de electrones u otras partículas incidentes}}$$

$\gamma$  varía en un margen muy amplio; desde pequeños valores tales como  $10^{-2}$  hasta valores realmente grandes como  $10^2$ .

La emisión secundaria aparece como un fenómeno parásito e indeseable en algunos casos, mientras que es útil en otros.

#### c) Emisión de campo<sup>[1]</sup>

La presencia de un campo eléctrico intenso adyacente a la superficie de un metal puede provocar la emisión de electrones de un cátodo frío. Se puede demostrar por medio de un cálculo de electrostática que el efecto de un campo aplicado es disminuir la barrera de potencial en la superficie del metal y de esta forma capacitar a más electrones para que escapen. Esta es la causa del efecto Schottky mencionado en la emisión termoiónica, en relación con la emisión termoiónica por cátodos calientes. El efecto es, sin embargo, insuficiente para producir un número importante de electrones a temperaturas normales, y debe encontrarse algún otro mecanismo para explicar la emisión de los cátodos fríos.

#### d) Emisión fotoeléctrica<sup>[1]</sup>

En los cátodos termoiónicos se consigue la emisión de electrones elevando la temperatura de los electrones de conducción para comunicarles la energía cinética suficiente que les permita abandonar el metal del que proceden.

### 1.1.2 Procesos de descarga de un gas<sup>[1]</sup>

La conducción de electricidad en gases tiene lugar, como en los sólidos, por el paso de partículas cargadas a través de un medio. Sin embargo, debido a la diferente estructura de un gas, o a su falta de estructura, las leyes de conducción son completamente diferentes. Para destacar desde el principio algunas de las diferencias, podemos mencionar que el gas no tiene propiedades periódicas y que el movimiento de las moléculas gaseosas no está confinado a vibraciones alrededor de un punto de equilibrio, como ocurre con los iones de una red cristalina.

A continuación se presentan algunos tipos de descargas gaseosas.

#### a) La descarga Townsend

Aumentando la tensión aplicada hasta algunos centenares de volts se verá que la corriente entre electrodos crece por encima del valor de saturación ( $10^{-12}$  Amperes/cm<sup>2</sup>) como se muestra en la figura 1.1, con un ritmo que aumenta rápidamente. Esta condición se denomina descarga de Townsend. Es sintomática de un estado en el que el campo eléctrico es lo bastante intenso para acelerar a los electrones entre colisiones inelásticas hasta un punto en el que alcanzan una energía suficiente para ionizar átomos del gas. Los electrones liberados de esta forma quedan disponibles para incrementar más aun el proceso, hasta que se genera en el gas una condición de alud, caracterizada por un crecimiento exponencial del número de portadores de carga disponibles para conducción.

#### b) El criterio de la ruptura de Townsend y la descarga automantenida

El flujo de corriente es causado por la aplicación de un campo que es suficientemente fuerte para provocar ionización por colisiones entre los electrones y los átomos neutros del gas. Sin embargo, debe ser sostenida por la existencia de unos pocos electrones primarios  $N_0$ ; sin ellos no puede haber corriente.

Ocurre, sin embargo, que los fenómenos de circulación de corriente precedentes no agotan todas las posibilidades de descargas eléctricas en gases. Hay, por lo menos, otros dos procesos distintos que pueden tener lugar, y para que existan, ninguno de los dos requiere la presencia de la corriente primaria.

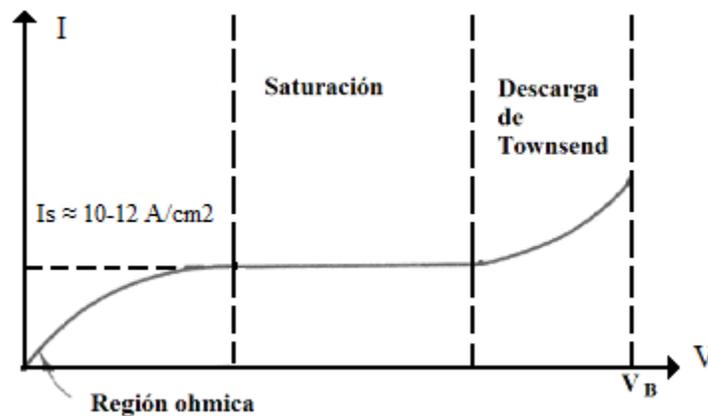


Figura 1.1. Corrientes débiles de un gas.

c) La descarga luminosa

Como se ha explicado, la ruptura eléctrica del gas da lugar a un nuevo régimen de conducción en el que el flujo de corriente es independiente de la disponibilidad de electrones primarios. Las características automantidas de este régimen dan a la descarga un grado de inestabilidad tal que la densidad de corriente se puede elevar en varios órdenes de magnitud sin necesidad de aumentar la tensión aplicada en absoluto. La corriente puede llegar a alcanzar valores del orden de un mA/cm<sup>2</sup> y aun aumentar más hasta asumir proporciones catastróficas a menos que se controle por un circuito externo. La condición catastrófica corresponde a otro nuevo mecanismo de conducción, denominado descarga de arco, que se tratará en el siguiente inciso. La descarga luminosa se genera inmediatamente después de la ruptura, el nombre está justificado por el hecho de que los gases conductores emiten radiación visible, que forma la base de aplicaciones de este fenómeno para iluminación.

d) La descarga de arco<sup>[1,2]</sup>

La transición de la descarga anormal a la descarga de arco se presenta en la figura 1.2 como discontinua, pero en muchos casos es posible encontrar un cambio continuo desde la descarga luminosa de alta tensión al arco de baja tensión y corriente alta. La corriente de descarga puede aumentar en varios órdenes de magnitud, mientras que la caída de potencial adquiere valores del orden de las decenas de volts.

Cuando la corriente de una descarga incandescente normal aumenta, la densidad de la corriente en el cátodo no sufre ninguna alteración. Esto se debe a que conforme la corriente crece el área del cátodo también lo hace. Después de que toda el área del cátodo participa en la descarga, la corriente puede incrementarse solamente si la diferencia de potencial entre los electrodos aumenta. Este fenómeno es llamado descarga luminosa anormal. Cuando la densidad de corriente crece, su crecimiento va acompañado por un aumento en la carga espacial y del campo en el cátodo. Finalmente la energía que los iones positivos

ceden al cátodo es lo suficientemente grande como para provocar emisión térmica de electrones. Cuando esto sucede, el voltaje a través de la descarga puede bajar hasta un valor característico correspondiente a una descarga de arco.

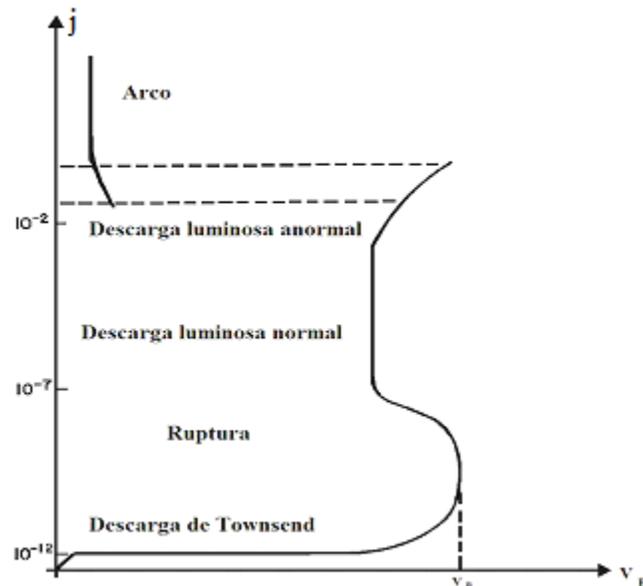


Figura 1.2. Característica I/V completa de una descarga de gas.

## 1.2 Plasmas<sup>[2]</sup>

Una plasma es un conjunto de partículas cargadas y neutras que satisfacen ciertos criterios que se mencionan en las siguientes secciones. Los electrones y iones que constituyen un plasma se producen por ionización de átomos o moléculas. Solamente bajo circunstancias especiales se forman plasmas en el medio natural de la superficie de la tierra, donde la energía requerida para la ionización no se encuentra comúnmente disponible.

Las partículas cargadas producen campos Coulombianos a través de los cuales interactúan unas y otras con cualquier campo eléctrico o magnético aplicado exteriormente; las partículas neutras interactúan unas con otras por medio de fuerzas de corto alcance que aparecen solo durante encuentros muy próximos; las partículas cargadas interactúan con las neutras por medio de campos de polarización mas complejos producidos por la distorsión de las orbitas de los electrones durante el acercamiento de las partículas cargadas.

Una de las influencias más poderosas en el comportamiento de un plasma es la interacción electromagnética de las partículas cargadas. Puesto que los campos electrostáticos de las partículas cargadas varían como el recíproco del cuadrado de la distancia, las fuerzas electrostáticas son de largo alcance y pueden actuar sobre un número considerable de otras partículas. Esta interacción de un gran número de partículas da lugar a que éstas reaccionen ante otras fuerzas de una manera colectiva, y este comportamiento colectivo constituye la principal característica de un plasma.

### 1.2.1 Condiciones para la existencia de un plasma<sup>[2]</sup>

Para producir un plasma es necesario liberar electrones que se encuentran normalmente ligados a átomos. De la tabla 1 es evidente que las energías de ionización para muchos elementos van desde varios electrónvolts (eV) a una cuantas decenas de eV. (Un eV es la energía adquirida por un electrón al pasar por un potencial electrostático de un voltio, y es igual a  $1.60 \times 10^{-19}$  Joules). Existen varias maneras por medio de las cuales se pueden añadir estas energías al sistema para producir ionización. El requisito esencial es que un electrón adquiera la energía suficiente para escapar del campo de fuerzas del átomo. Por lo general la energía proviene de las colisiones de algún tipo.

Tabla 1. Energías de ionización para algunos átomos y moléculas

| Gas                   | Energía de ionización (eV) |
|-----------------------|----------------------------|
| Hidrógeno             | 13.6                       |
| Helio                 | 24.6                       |
| Litio                 | 5.4                        |
| Neón                  | 21.6                       |
| Cesio                 | 3.9                        |
| Argón                 | 15.7                       |
| Mercurio              | 10.4                       |
| Molécula de hidrógeno | 15.4                       |
| Molécula de nitrógeno | 15.8                       |

Cuando se añade energía de ionización a una parte de los átomos de un gas neutro se forma un gas ionizado. Si se puede añadir una cantidad suficiente de energía total, el gas puede ionizarse completamente, sin que permanezcan en él partículas neutras.

Aun un gas parcialmente ionizado puede ser afectado por campos eléctricos y magnéticos aplicados externamente, y puede conducir corrientes eléctricas. Los iones y electrones sirven como portadores de carga más o menos en la misma manera que en un electrolito. Y, lo que es más importante, los campos colombianos electrostáticos de las partículas cargadas en el gas ionizado producirán las interesantes consecuencias de los efectos colectivos antes mencionados.

La presencia de efectos colectivos constituye la principal característica de un plasma. Una medición cuantitativa de ella puede obtenerse determinando la distancia a la cual se extiende el campo eléctrico de una partícula individual cargada antes de que su efecto sea anulado por las partículas de carga opuesta que se encuentran en la vecindad. Dicha longitud y algunas otras características más como: neutralidad o cuasi-neutralidad, frecuencia de un plasma, temperatura y la longitud llamada también longitud de Debye son las características o parámetros de un plasma que se mencionan a continuación.

a) Longitud de Debye<sup>[3]</sup>

El alcance de la fuerza eléctrica entre dos partículas es infinito, pero en el interior de un plasma este se reduce debido a la presencia de las demás cargas de signo contrario que rodean a cualquier carga.

Suponiendo un gran número de partículas próximas, de manera que el campo eléctrico pueda ser tomado como una función continua de la distancia, la distancia crítica de blindaje deducida por Debye es:

$$D = \left( \frac{kT}{4\pi n e^2} \right)^{1/2} \quad \dots (9)$$

donde la constante de Boltzmann es  $k = 1.38 \times 10^{-16}$  J/K y T la temperatura efectiva en kelvin (K) de las partículas de carga  $e$  ( $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C), de las cuales hay  $n$  por unidad de volumen. La longitud de Debye proporciona una medida de la distancia a la cual la influencia de una sola partícula con carga es dominante. Más allá del valor D, el campo eléctrico y, por tanto, la influencia de la partícula individual, es nula, y los efectos colectivos dominan.

b) Neutralidad o cuasi-neutralidad<sup>[3]</sup>

Generalmente un plasma está formado por igual número de cargas positivas y negativas, lo que anula la carga total del sistema. En tal caso se habla de un plasma neutro o casi-neutro. También existen plasmas no neutros o inestables, como el flujo de electrones dentro de un acelerador de partículas, pero requieren algún tipo de confinamiento externo para vencer las fuerzas de repulsión electrostática.

La neutralidad casi total es, entonces, otra característica, aunque no independiente, para la existencia de un plasma, y puede escribirse:

$$n_i \approx n_e \quad \dots (10)$$

Sin embargo, estas condiciones de estado estacionario no son suficientes para asegurar que tenga lugar los movimientos colectivos de un plasma.

c) Frecuencia de un plasma<sup>[9]</sup>

Uno de los más rápidos e importantes movimientos colectivos es la oscilación de la mayoría de los electrones del plasma respecto de los iones. La frecuencia de esta oscilación suministra una escala de tiempos significativa contra la cual pueden compararse los mecanismos que tienden a destruir dichos movimientos colectivos.

Es de esperar que los electrones del plasma puedan oscilar colectivamente alrededor de los iones mucho más masivos; la atracción colombiana ion-electrón proporciona la fuerza

de restitución colectiva que se necesita. De aquí que la frecuencia de oscilación, que es comúnmente llamada la frecuencia del plasma, está dada por la ecuación:

$$v_p = \left( \frac{ne^2}{\pi m} \right)^{1/2} \quad \dots (11)$$

donde  $m$  es la masa del electrón ( $m = 9.1 \times 10^{-31}$  kg) y esta frecuencia queda expresada en términos de las unidades como ciclos por segundo (Hertz).

d) Temperatura: velocidad térmica<sup>[9]</sup>

Por lo general las partículas de una determinada especie localizadas en un punto dado no tienen igual velocidad: presentan por el contrario una distribución que en el equilibrio térmico es descrita por la distribución de Maxwell-Boltzmann. A mayor temperatura, mayor será la dispersión de velocidades (más ancha será la curva que la representa).

Una medida de tal dispersión es la velocidad cuadrática media que, en el equilibrio térmico, se denomina también velocidad térmica. En tal caso, se menciona la temperatura que correspondería a una velocidad cuadrática media determinada. La velocidad térmica de los electrones es:

$$v_T = \left( \frac{kT}{m} \right)^{1/2} \quad \dots (12)$$

donde nuevamente  $m$  es la masa del electrón y  $T$  la temperatura de los electrones.

### 1.2.2 Ocurrencia del plasma<sup>[2]</sup>

Una vez habiendo presentado las condiciones que requiere un plasma, podemos ahora describir varios sistemas y situaciones en los cuales pueden tener lugar los plasmas. Estas situaciones están comprendidas en tres grandes categorías: dispositivos de plasma, tales como luces de neón, que son de uso común; plasmas de laboratorio, que son usados para investigar las propiedades del plasma y para producir dispositivos como reactores de fusión termonuclear, y plasmas cósmicos, que existen a través de casi todo el universo extraterrestre.

Es claro que la representación útil de un plasma puede hacerse en términos de la densidad de electrones, su temperatura, cantidades dependientes de ellas, la distancia de Debye y la frecuencia del plasma. Entonces los diferentes plasmas pueden catalogarse, como en la figura 1.7, en una grafica de densidad de electrones contra temperatura de electrones. Es evidente de inmediato la gran variedad en las que los plasmas tienen lugar, y pueden hacerse comparaciones entre plasmas cuyos parámetros difieren grandemente.

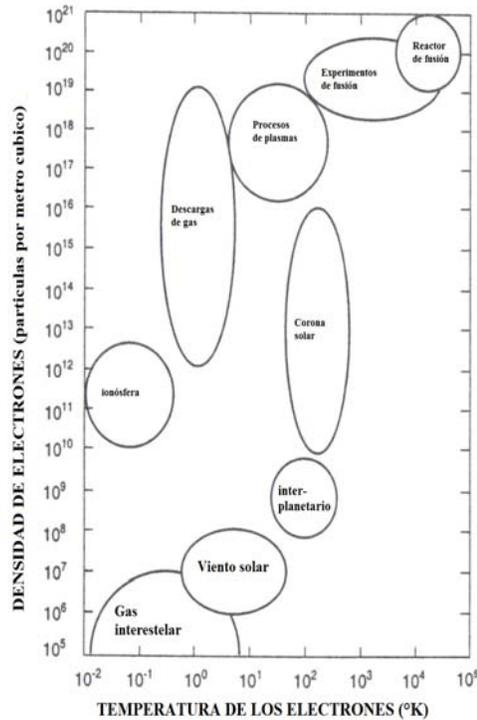


Figura 1.7. Parámetros para una variedad de plasmas cósmicos y de laboratorio en términos de la densidad de electrones y la temperatura.

### 1.2.3 Ionización<sup>[2]</sup>

La ionización es el proceso físico mediante el cual se producen iones, estos son átomos o moléculas cargadas eléctricamente, debido al exceso o falta de electrones respecto a un átomo o molécula neutra. Hay varias maneras por las que se pueden formar iones de átomos o moléculas.

Además de la conducción por medio de iones y electrones, el flujo de corriente puede lograrse añadiendo partículas cargadas al gas; por ejemplo, un cátodo caliente emite electrones que se introducen en el gas y permiten la conducción. Si la diferencia de potencial es suficientemente grande, los electrones emitidos por el cátodo pueden adquirir bastante energía como para producir ionización en el gas por medio de colisiones.

Una vez que ya hay iones y electrones en el gas, la situación se complica. Los iones y los electrones se mueven en direcciones opuestas bajo la acción de los campos eléctricos aplicados, y al hacerlo se producen colisiones con otros electrones, iones y átomos de gas, que afectan considerablemente la descarga. Para dar una idea de la importancia que tienen en este fenómeno los iones y los electrones, compararemos sus velocidades relativas. Después de pasar por una diferencia de potencial  $V$ , y considerando que la energía cinética ganada es igual a la pérdida de energía potencial, tenemos, para iones y electrones que parten con una velocidad inicial cero, lo siguiente:

$$\frac{1}{2} m v_e^2 = |eV| \quad \dots (13)$$

$$\frac{1}{2} M v_i^2 = |eV| \quad \dots (14)$$

donde  $m$  y  $M$  son la masa del electrón y la del ion, respectivamente y  $v_e$  y  $v_i$  son las velocidades correspondientes.

Tanto los iones como los electrones sufren colisiones elásticas e inelásticas. En una colisión elástica, la energía cinética de las partículas que la producen se conserva, en tanto que en una colisión inelástica no sucede así; en las colisiones inelásticas el cambio en la energía cinética se compensa por la variación de la energía interna de una o varias partículas que en ella toman parte.

Los iones por ser mucho más masivos que los electrones, no adquieren mucha velocidad del campo eléctrico aplicado ni de las colisiones con aquellos. La energía que poseen es transferible sin gran dificultad a los átomos neutros del gas. Por otra parte, los electrones pueden adquirir fácilmente altas velocidades y mantenerlas, y contribuir por medio de colisiones inelásticas a producir una mayor excitación y ionización en el gas.

La excitación y la ionización de un átomo constituyen dos de los mas importantes procesos de colisiones inelásticas que puede sufrir un electrón. La ionización consiste en separar a los electrones de los átomos a los cuales están ligados por medio de energías de ionización presentadas en la tabla 1. La excitación eleva el nivel energético de los átomos sobre el estado de mínima energía, pero no es suficiente para alcanzar la ionización; para la excitación, basta una energía menor que 10 eV. La mayoría de los estados atómicos decae en tiempos del orden de  $10^{-8}$  segundos, emitiendo la radiación característica de la energía del estado, después de ser excitados.

Aparte de los mecanismos de excitación y ionización, los electrones pueden perder energía lentamente solo por medio de colisiones elásticas. Es claro que, cuando los electrones llegan al ánodo del tubo de descarga, este es calentado a merced de la energía cinética que aun les sobra a los electrones.

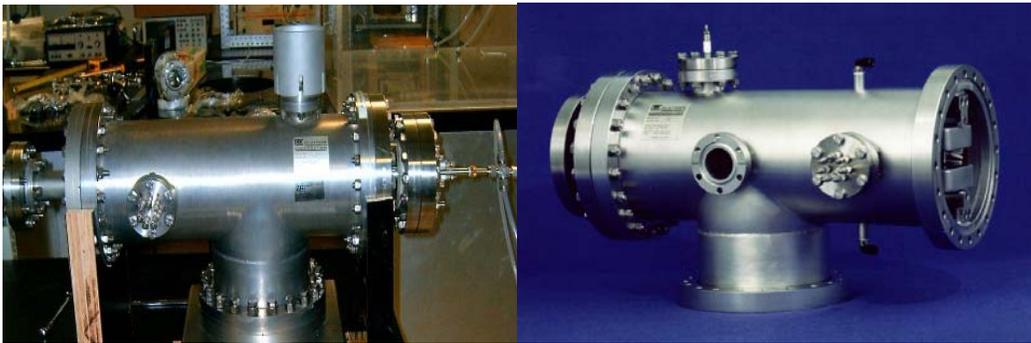
## CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

El trabajo se realizó en el acelerador de baja energía de 1 a 10 keV, del Taller de Colisiones del edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México.

El acelerador tiene como parte primordial un cañón de iones, que es el encargado de generar el haz de iones con el cual trabajamos. Se adaptaron un sistema de vacío, sistema de enfriamiento e inyección de gases, y se conectó a la línea del acelerador. Al final de esta línea tenemos una cámara de reacción que compone la parte final de este acelerador.

### 2.1 Cañón de iones

El cañón de iones es de la marca COLUTRON modelo G-1 y se muestra en la fotografía 2.1:



Fotografía 2.1 cañón de iones.

El cañón de iones está compuesto de un soporte para la fuente de iones, un receptor de calor, un sistema de aceleración y de enfoque (compuesto por un sistema de lentes), placas de deflexión vertical y filtro de velocidades que se muestran en la figura 2.1.

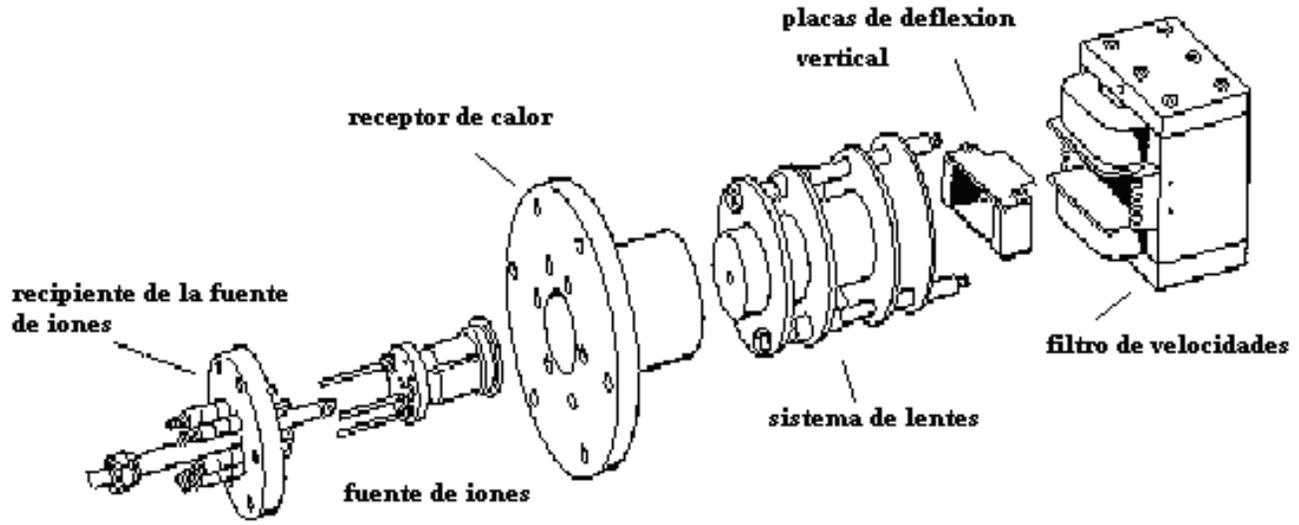
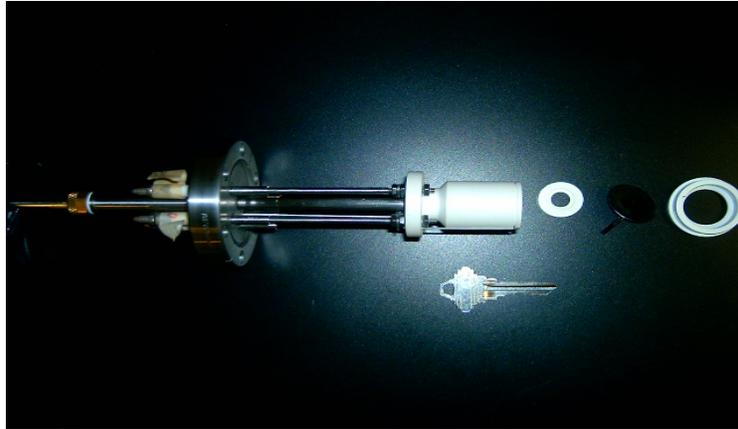


Figura 2.1. Componentes del cañón de iones.

### 2.1.1 Fuente de iones

La fuente de iones es una de las partes fundamentales y de gran importancia del cañón, ya que es ahí donde se generan los iones de acuerdo al gas o mezcla de gases que se introduzcan. La fuente consta de un cuerpo que es de un material cerámico de nitrato de boro. Dentro del cuerpo está un filamento de tungsteno que es el generador de electrones. También tiene un anillo del mismo material que el cuerpo de la fuente, el cual aísla al filamento del ánodo y por último una tapa que es del mismo material del cuerpo de la fuente que sostiene al anillo y al ánodo. Esta fuente trabaja como se describe en el capítulo 1 en la sección 1.1.1. Se aplica una corriente al filamento, la corriente calienta el filamento provocando que los electrones se desprendan del material de tungsteno del que está compuesto el filamento y así los electrones puedan ionizar el gas que es introducido a la fuente para generar el haz.

A continuación se hablará de las fuentes de poder así como de sus conexiones y características para la fuente de iones. En la fotografía 2.2, se muestra la fuente de iones con la que se trabajó y en la figura 2.2, se muestra el esquema de la fuente de iones. El modelo empleado es 101 fuente de iones (nitrato de boro).



Fotografía 2.2. Fuente de iones.

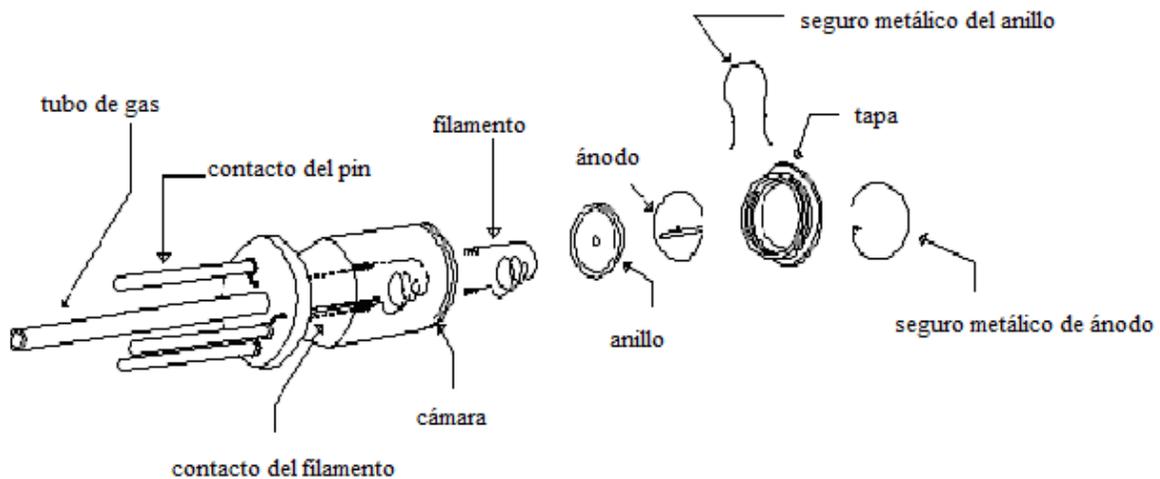


Figura 2.2 Esquema fuente de iones.

La fuente tiene tres elementos principales que son: la cámara, el filamento y el ánodo.

- a) La cámara, como se muestra en la figura 2.2 es la parte que encierra al filamento y admite el gas que es aplicado para ser ionizado.
- b) El filamento es la parte principal de la fuente. Al filamento se le aplican un voltaje y una corriente que lo calientan. El tungsteno emite electrones que serán los encargados de ionizar el gas que es aplicado.
- c) El ánodo es la parte secundaria de la fuente. Se le aplican un voltaje y una corriente haciendo que los iones del gas en la fuente se aceleren.

El ánodo y el filamento están conectados a unas fuentes de poder marca Kepco. Para el filamento, las características de la fuente son un voltaje de 0 a 20 volts y una corriente de 0 a 25 amperes. Para el ánodo las características de la fuente son un voltaje de 0 a 100 volts y una corriente de 0 a 5 amperes.

Estas fuentes están protegidas y aisladas por una caja de acrílico, como medida preventiva para los operadores del acelerador. En las perillas de las fuentes, se instalaron dos tubos de acrílico (uno para cada perilla) y así poder subir la corriente o el voltaje según sea el caso sin necesidad de tocar las fuentes.

Se habla de protecciones con acrílico, ya que se maneja un alto voltaje, así como una alta corriente. Las fuentes del ánodo, del filamento y de la fuente de aceleración, están conectadas entre si como se muestra en la figura 2.3.

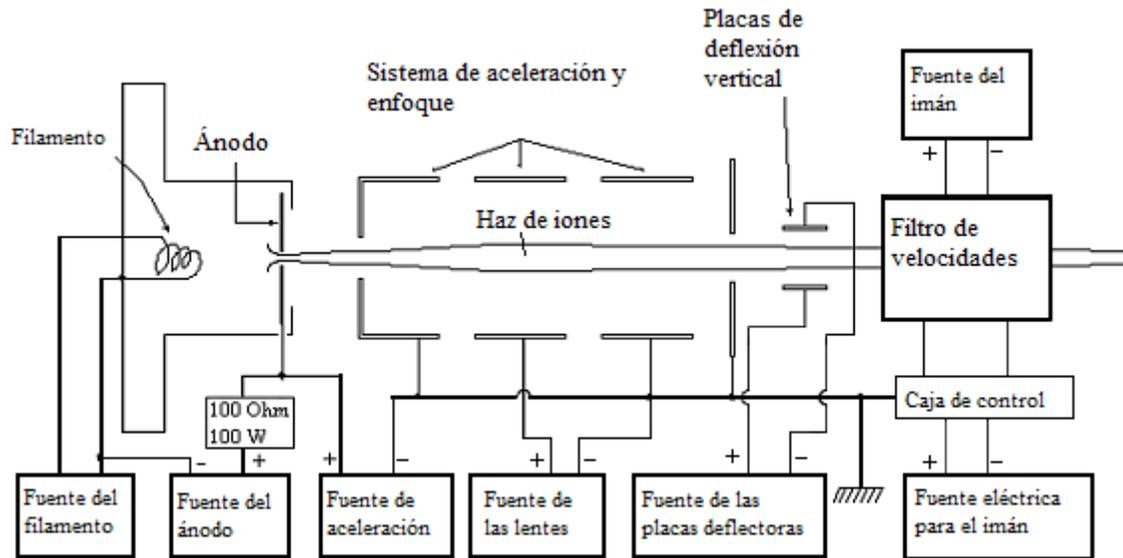
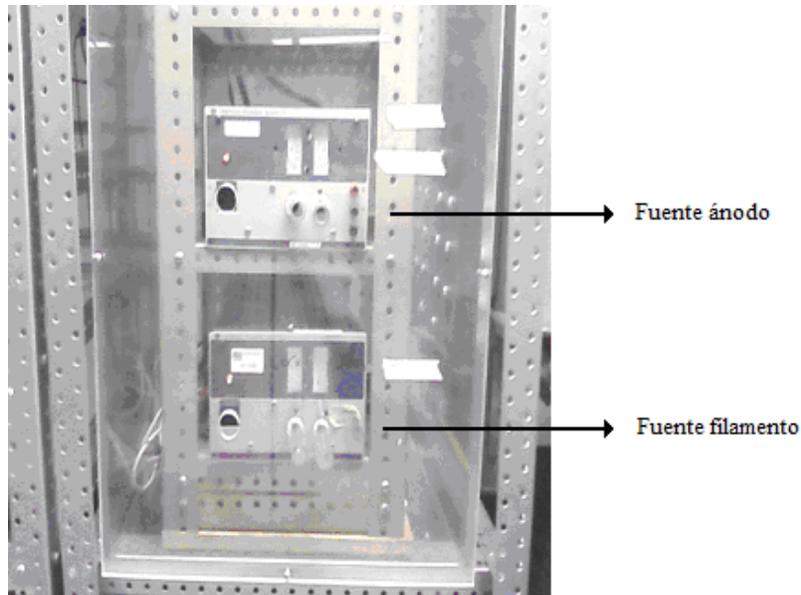


Figura 2.3. Diagrama del circuito eléctrico del cañón de iones.

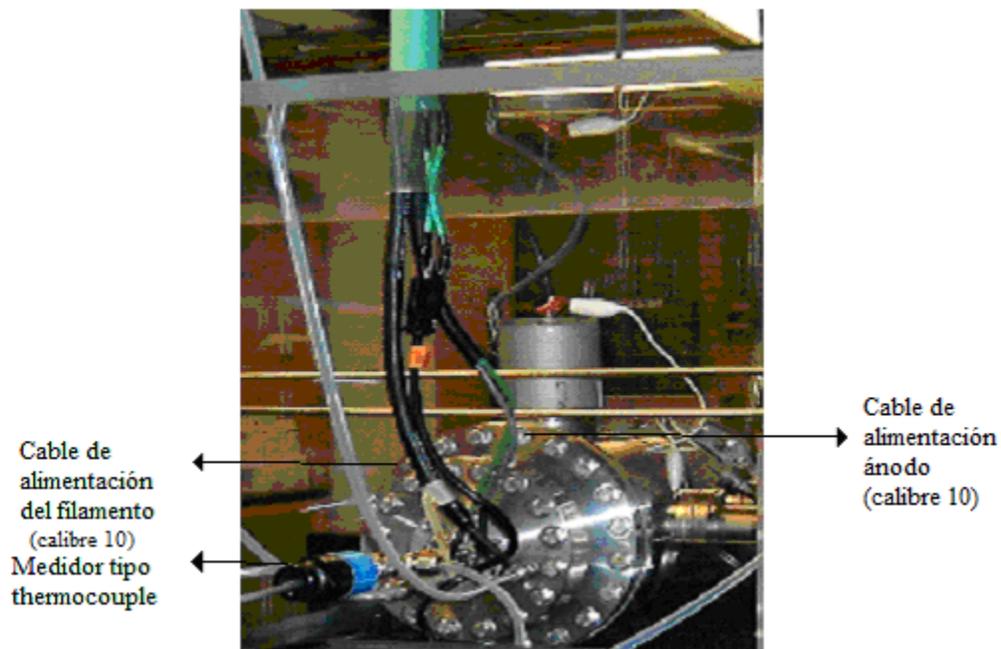
Al estar las fuentes ya mencionadas conectadas entre sí, se puede decir que las fuentes están flotadas, esto quiere decir que el voltaje que se aplique a una de ellas estará aplicándose a las otras dos fuentes por igual. Por ejemplo, si a la fuente de aceleración se le aplica un voltaje de 5000 volts, las fuentes del ánodo y filamento deberán tener el mismo voltaje. Que las fuentes estén flotadas también significa que podemos aumentar la diferencia de potencial que existe entre al ánodo y las lentes Einzel para que el haz de iones pueda ser acelerado como se muestra en la figura 2.3.

Si tomamos en cuenta el diagrama de la figura 2.3, vemos que las conexiones son vitales para poder generar el haz de iones, ya que si alguna de estas conexiones o alguna de las fuentes falla no podrá generarse el haz y por el contrario podríamos tener un corto circuito dentro del cañón o hasta en las mismas fuentes lo cual podría tener consecuencias serias.

Las fuentes están conectadas al ánodo y al filamento en una brida del cañón (el receptor de la fuente de iones). La fotografía 2.3 muestra las fuentes que alimentan el ánodo y el filamento del cañón de iones. En la fotografía 2.4 se muestran las conexiones de las fuentes de voltaje en el cañón de iones.



Fotografía 2.3. Fuentes del filamento y del ánodo.

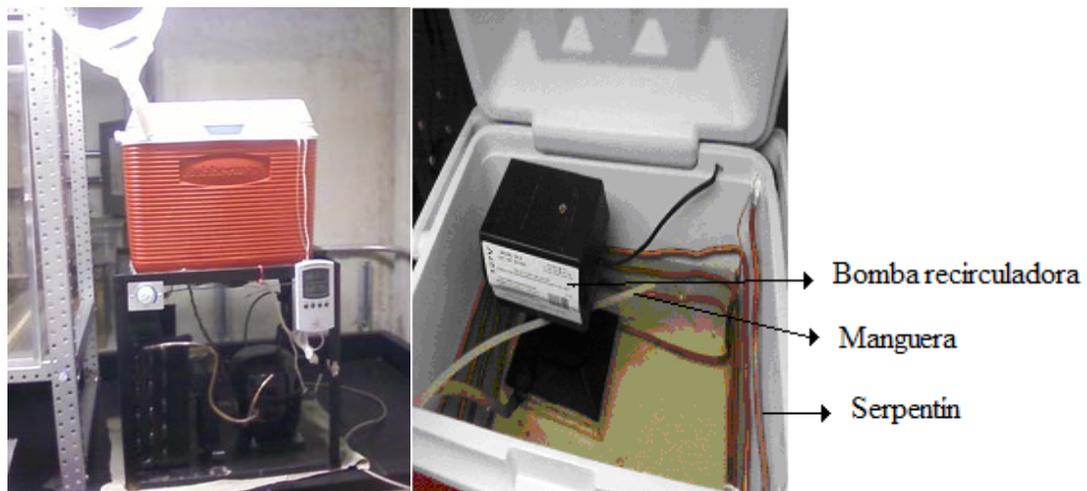


Fotografía 2.4. Conexiones de las fuentes en el cañón.

### 2.1.2 Sistema de enfriamiento

La fuente de iones genera una gran cantidad de calor al hacerle pasar una corriente al filamento haciendo que el cañón de iones incremente su temperatura en el interior. Además, las colisiones entre los electrones, los iones y los átomos del gas generan una temperatura extra. Para disminuir la temperatura dentro del cañón se instaló un sistema de enfriamiento, que consta de un pequeño refrigerador que recircula el agua por el cañón de iones haciendo que la temperatura disminuya dentro del cañón por medio del contacto térmico con el agua, el agua tiene una temperatura aproximadamente de entre 5 y 7 grados centígrados ya que si

la temperatura del agua es mas baja esta podría congelarse dentro de la tubería y ya no recircular provocando el calentamiento excesivo dentro del cañón, el agua es recirculada por una pequeña bomba que esta dentro del contenedor de agua del sistema de enfriamiento. Este pequeño refrigerador esta protegido también con una caja de madera y una tapa de acrílico, ya que se va a conectar con las fuentes del ánodo y del filamento, esto quiere decir que se pondrá a un mismo potencial, este voltaje tiene una capacidad de 10000 volts que es el voltaje máximo de aceleración y enfoque, por lo que se protege al operador del acelerador. En la fotografía 2.5 se observa el sistema de enfriamiento. Cabe mencionar que fue construido con una hielera, un motor para refrigerador y por dentro de la hielera se instaló un serpentín por donde pasa el gas freón y enfría el agua. Así mismo, en el interior de la hielera o recipiente está la bomba que recircula el agua.



Fotografía 2.5. Sistema de enfriamiento

### 2.1.3 Sistema de gases

El cañón de iones cuenta con la instalación de un sistema de gases, que se hace a través de la base que soporta la fuente de iones. Por ella se administra el gas o la mezcla de gases que se desea(n) ionizar para formar el haz. La instalación está compuesta de dos tanques de gas (en estos momentos de hidrógeno y argón) estos tanques tiene una capacidad de un litro a presión atmosférica, sin embargo, los tanques fueron llenados a alta presión por lo que no se puede saber la capacidad del gas, también la instalación está compuesta por algunas componentes como son reguladores, válvulas y el sistema de tubería. La instalación de los reguladores se hizo precisamente para poder controlar la presión a la salida de los tanques de gas ya que estos tanques vienen con una presión muy alta (que el fabricante no especifica). Una alta presión puede provocar que se rompan partes de la fuente de iones dentro del cañón como la tapa, el ánodo, el anillo o hasta el mismo cuerpo de la fuente y provocar problemas serios. Los tanques se conectan a los reguladores con tubería de acero inoxidable (tubing) no magnético de 1/8 de pulgada y los reguladores se conectan con la misma tubería a las válvulas de fuga variable modelo VLVE – 2000 de la marca INTERCOVAMEX, estas válvulas tienen un mecanismo de zafiro que permite un flujo moderado del gas, también resisten una presión de gas máxima de 500 psi, pero la presión

con la que se trabaja a la salida de los reguladores es de aproximadamente 80 psi por lo que no excede del intervalo de presión, por ultimo algo importante dentro de las características de estas válvulas es que el intervalo de vacío que soportan es de  $10^{-11}$  torr, así que el vacío dentro del acelerador no afecta el intervalo de las válvulas ya que se trabaja con un vacío máximo de  $10^{-7}$  torr dentro del cañón. En la figura 2.4 se muestra el diagrama del sistema de gases y en la fotografía 2.6 se muestra el sistema de gases los tanques, válvulas y líneas del gas (tubería).

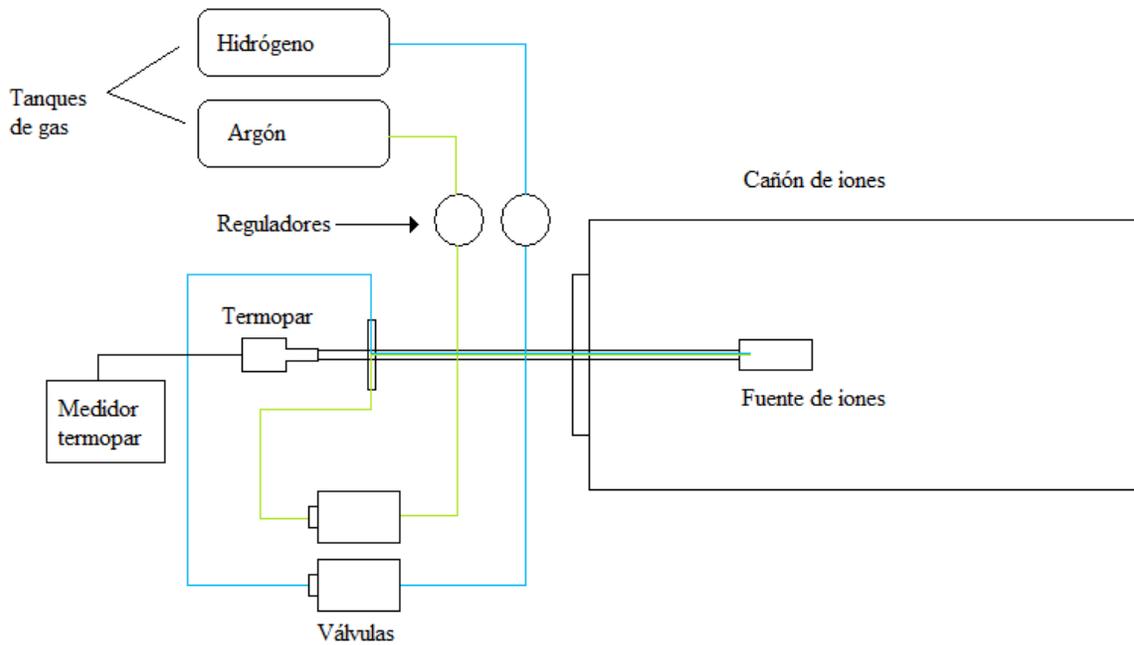


Figura 2.4. Diagrama del sistema de gases.



Fotografía 2.6. Sistema de gases.

### 2.1.4 Sistema de aceleración y enfoque<sup>[12]</sup>

Una vez que es generado el haz de iones del gas aplicado, se le hace pasar por otro sistema dentro del cañón que es el encargado de enfocar y de acelerarlo. El proceso se hace a través de un sistema de enfoque que es conocido como lentes Einzel que son unas lentes electrostáticas. Las lentes enfocan el haz por medio de un campo eléctrico aplicado el cual hace que el haz pase entre las lentes y enfoque y acelere el haz de iones. En la fotografía 2.7 se muestran parte de las lentes del cañón.



Fotografía 2.7. Lente Einzel, vista desde el lugar donde se coloca la válvula neumática.

De manera análoga a la óptica, en la cual una lente hace que los rayos luminosos que inciden sobre ella se concentren en un punto, existen lentes electrostáticas que se emplean para enfocar un haz de partículas cargadas. Así como existen lentes delgadas y gruesas en óptica, existen también lentes electrostáticas delgadas y gruesas. Los iones provenientes de la fuente, ya acelerados, son por naturaleza divergentes. Este hecho hace deseable disponer de un sistema que forme un haz paralelo, sin que se modifique la energía de los iones previamente fijada. Esto se consigue con una lente electrostática de tres electrodos, de simetría cilíndrica, conectando el primero y tercer elementos al mismo potencial,  $U_1$ , y el segundo a un voltaje  $U_2$ , variable. A este sistema de enfoque se le conoce con el nombre de lente "Einzel".

La acción de enfoque de esta lente está determinada por el cociente  $U_2/U_1$  que es proporcional al incremento (o decremento) relativo de energía de los iones positivos a su paso por la lente. Una convención en el estudio de lentes electrostáticas es considerar a los voltajes  $U_1$  y  $U_2$  medidos con respecto a un voltaje para el cual las partículas cargadas tengan energía cinética cero. La figura 2.5 ilustra la habilidad de la lente "Einzel" para enfocar un haz de iones positivos de carga  $e$ . Las curvas entre los electrodos son equipotenciales, y se ha dibujado en varios puntos la fuerza eléctrica sobre un ion; a los puntos  $F_1$  y  $F_2$  se les llama primero y segundo focos principales de la lente (medidos a partir del centro del electrodo intermedio). La lente "Einzel" que se acopló en el cañón de iones viene de fabrica y es de acero inoxidable, con un diámetro interior de 4.46 cm, y longitud de 13.87 cm.

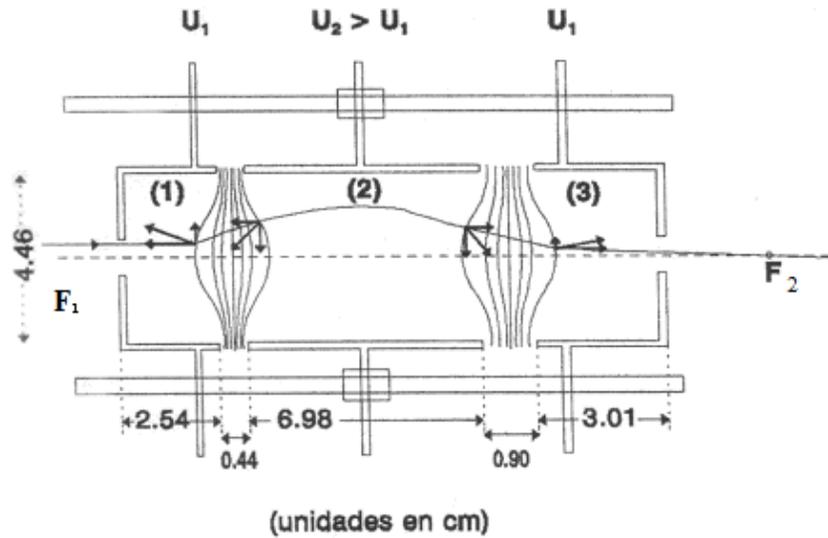


Figura 2.5. Sistema de lentes Einzel.

Posteriormente el haz pasará por un filtro de velocidades para seleccionar los iones con los que se requiere trabajar.

### 2.1.5 Placas de deflexión vertical

Tal como se muestra en la figura 2.1, después de las lentes Einzel se encuentran unas placas deflectoras. Estas placas son las encargadas de dirigir el haz de iones de tal forma que el haz quede lo mas centrado posible antes de llegar al filtro de velocidades. Las placas están conectadas a una fuente de voltaje con la cual se aplica un voltaje positivo a una de las placas. Se aclara que el voltaje es positivo ya que al ionizar el gas, se producen partículas que están cargadas positivamente, entonces si se aplica un voltaje negativo éste atraería al haz y colisionaría con la placa haciéndolo desaparecer antes de que entre al filtro de velocidades. Esto provocaría que no saliera el haz del cañón de iones. La otra placa está a tierra para evitar que los electrones de la placa sean atraídos por el haz y por consecuencia el haz tuviese una desviación en su trayectoria.

### 2.1.6 Filtro de velocidades<sup>[10]</sup>

El filtro de velocidades se encuentra después del sistema de aceleración y enfoque y de las placas de deflexión vertical. El filtro es el encargado de seleccionar el haz. Este filtro está compuesto por un imán, así como de placas electrostáticas. El filtro de velocidades es alimentado por dos fuentes; la primer fuente alimenta al imán, la fuente que tiene un intervalo de 3.17 amperes de corriente y 11.2 volts de voltaje. La segunda fuente está conectada a la caja de control y va a las placas de deflexión horizontal del filtro (placas electrostáticas).

Como ya se mencionó, el filtro está compuesto por unas placas electrostáticas y un imán. Cuando se le aplica un voltaje y una corriente en el electroimán producimos un campo magnético **B**. En las placas electrostáticas se aplica un voltaje y una corriente de

manera que se crea un campo eléctrico  $\mathbf{E}$ . Se fijan las condiciones de manera que el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  sea perpendicular al campo magnético  $\mathbf{B}$  y a su vez estos dos campos son perpendiculares al haz de iones, como se muestran en la figura 2.6.

El funcionamiento del filtro es de la siguiente manera: después de haber pasado por el sistema de aceleración y enfoque (lentes Einzel y placas de deflexión), el haz llega al filtro de velocidades. Se generan los campos  $\mathbf{B}$  y  $\mathbf{E}$  perpendiculares al haz de manera que se selecciona el ion con el cual se requiere trabajar. Hay que tener en cuenta que cuando se produce el haz de iones, éste no sólo lleva iones positivos, también puede tener otras partículas como los electrones y los fotones. Cuando el haz pasa a través de estos campos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$ , la fuerza que actúa sobre cada partícula con carga  $ne$  y que además tiene una velocidad  $\mathbf{v}$  está dada por la fuerza de Lorentz:

$$\mathbf{F} = ne (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \dots (2.1)$$

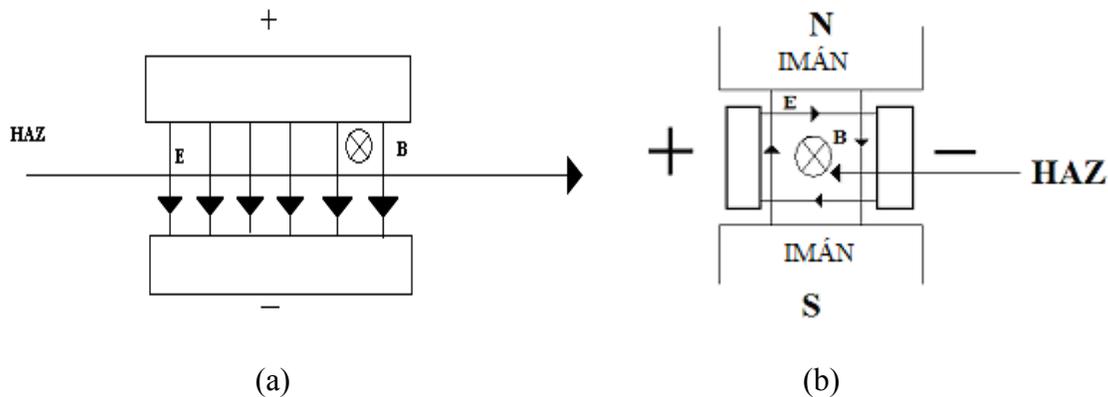


Figura 2.6. Filtro de velocidades: (a) Vista superior. (b) Visto desde la entrada del haz.

Cuando el haz de partículas cargadas pasa a través del filtro con una velocidad  $\mathbf{v}$ , el haz será deflectado en una dirección por el campo eléctrico y en otra dirección por el campo magnético. La magnitud de estas deflexiones puede ser calculada por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} F_B &= Bqv && \text{Fuerza magnética.} \\ F_E &= Eq && \text{Fuerza eléctrica.} \end{aligned}$$

Para la fuerza magnética,  $\mathbf{B}$  es el campo magnético,  $q$  es la carga de la partícula y  $\mathbf{v}$  es la velocidad del haz de partículas. Sólo aquellos iones que tengan una velocidad  $\mathbf{v} = \mathbf{E} / \mathbf{B}$  podrán pasar a través del filtro sin desviarse por lo que la velocidad  $\mathbf{v}$  está dada por  $v = (2qV_a/m)^{1/2}$ , siendo  $m$  la masa de las partículas y  $V_a$  el voltaje de aceleración. También podemos encontrar el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en términos del campo magnético  $\mathbf{B}$  igualando las dos fuerzas y sustituyendo la velocidad  $\mathbf{v}$ .

Sin embargo, si igualamos el campo eléctrico y el campo magnético y sustituimos la velocidad  $v$ , veremos que un ion con velocidad  $v'$  y masa  $m$  que se mueve a través del filtro no será deflectado si

$$E = B\sqrt{\frac{2qV_a}{m}} \quad \dots (2.2)$$

De la ecuación (2.2) se pueden obtener las condiciones para la masa  $m$  simplemente despejando

$$m = 2qV_a\left(\frac{B}{E}\right)^2 \quad \dots (2.3)$$

Como el filtro es muy similar a una bobina se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$B = kI \quad \dots (2.4)$$

donde  $I$  es la corriente de la bobina y  $k$  es una constante que depende del número de vueltas de la bobina, de la geometría de la misma bobina y de la constante de permeabilidad  $\mu_0$ . Por lo que sustituyendo en la ecuación (2.3) podemos obtener:

$$\sqrt{m} = \frac{\sqrt{2qV_a}}{E} kI \quad \dots (2.5)$$

Ahora bien, si despejamos la corriente  $I$  obtendremos que:

$$I = K\sqrt{m_i} \quad \dots (2.6)$$

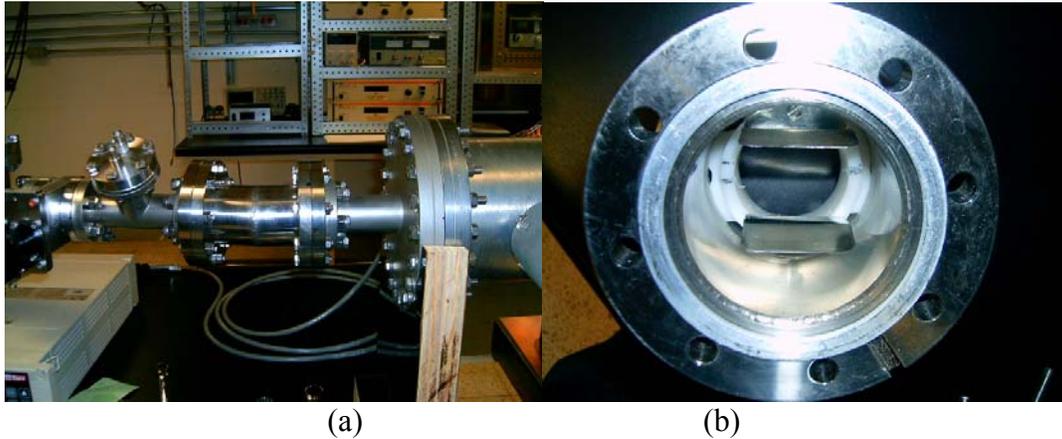
que es la corriente que se obtiene al variar el campo magnético ya que las demás variables permanecen constantes al momento de la medición y donde  $K = \frac{E}{k\sqrt{2qV_a}}$ .

## 2.2 Línea del acelerador

### 2.2.1 Codo de 10°

Una vez que el haz es acelerado y filtrado en el cañón el haz de iones sale para encontrarse con un codo de 10°. Esta pieza se coloca por lo siguiente: en el interior de la fuente de iones, también se generan fotones. La corriente eléctrica producida por ellos es demasiado intensa para los detectores tipo channeltron, los cuales se descompondrían con esta corriente. Por esta razón, se desvían las partículas cargadas y las partículas neutras se pierden y no llegan al detector. El codo de 10° está localizado a la salida del cañón de iones; en su interior hay un par de placas paralelas. Para poder desviar el haz se aplica un campo eléctrico con una intensidad entre 0 y 300 volts; este voltaje es aplicado por una fuente Acopian que tiene un intervalo de voltaje de 0 a 2.5 kv. y de 0 a 25 mA. A continuación del codo está una "T" con una brida con terminales para alimentar las placas; solamente una de las placas del codo de 10° está alimentada con voltaje positivo, la otra

placa está a tierra. En la fotografía 2.8 se muestran el codo de 10° a la salida del cañón de iones y la “T” así, también se muestra el codo de 10° y las placas que están por dentro.

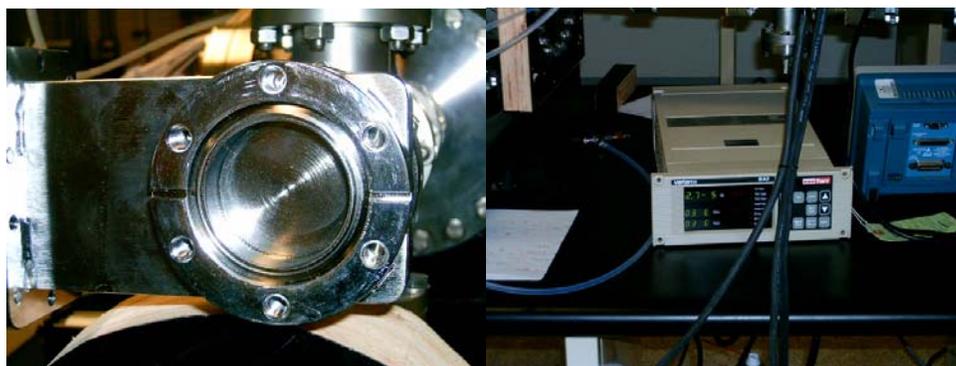


Fotografía 2.8. (a) Unión entre cañón, codo y T. (b) Codo 10° por dentro

### 2.2.2 Válvula, detector y bandera

Después de la “T” se encuentra una válvula manual que aísla en dos partes el sistema experimental; se aísla el cañón de iones de la cámara de reacción (que está al final de la línea del acelerador). Si es necesario trabajar en alguna sección del acelerador se cierra la válvula y se conserva el vacío en la región donde no se está trabajando.

Enseguida de esta válvula se encuentra un detector de vacío cuya función es medir el vacío dentro de la cámara de reacción. El detector de vacío del cañón está muy lejos de la cámara de reacción y no alcanza a tomar una lectura del vacío en esta parte del acelerador. En la fotografía 2.9 se muestran la válvula (cuando está cerrada) y el detector en el sistema experimental.



Fotografía 2.9. Válvula y detector de vacío (medidor blanco).

La siguiente pieza en el acelerador es el primer medidor del haz de iones del acelerador: una bandera. La bandera no es más que una pieza de metal donde incide el haz. La bandera está colocada de forma ortogonal al haz; en la punta tiene una pequeña placa de aluminio de un centímetro de ancho por un centímetro de largo. Esta placa está conectada con alambre

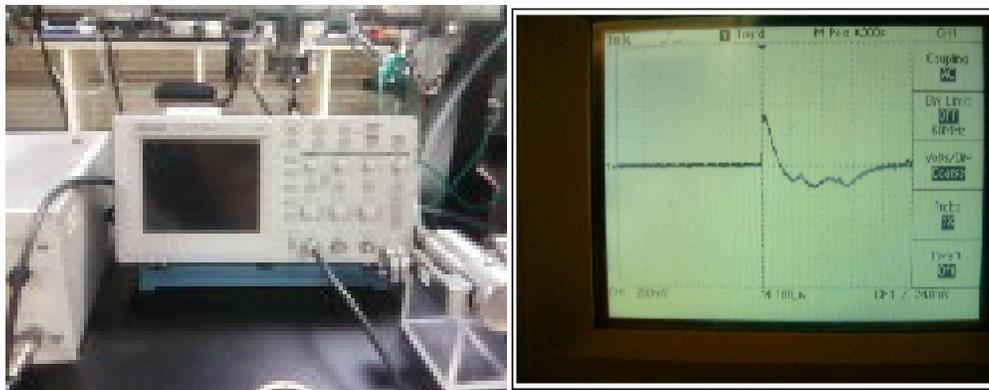
de cobre que va a una brida en una de sus terminales, cuando el haz colisiona con la placa se produce la corriente y esta a su vez se registra en el osciloscopio como señal, cabe mencionar que en las primeras pruebas las corrientes se registraron en forma de señal con el osciloscopio, pero después de fijar parámetros la medición se hizo con el electrómetro. La bandera se instaló en un atravesador, el cual a su vez se introdujo en una cruz. Se puso en la parte superior de la cruz y su conexión en la parte inferior de la misma. La fotografía 2.10 muestra la bandera en el dispositivo experimental y cómo está conectada.



Fotografía 2.10. Bandera

### 2.2.3 Osciloscopio

Ahora bien para la medición del haz se tiene la bandera que se describió en la sección 2.2.2. Como se indicó, la bandera se colocó en un atravesador el cual se puede desplazar verticalmente para subir y bajar la bandera. Si se sube, entonces la bandera deja pasar el haz de iones para poder realizar experimentos de colisiones en la cámara de reacción. También tiene la función de poder detectar el haz de iones girando la perilla la cual baja la pequeña placa de aluminio. De esta manera el haz choca con la lámina y produce una corriente. La corriente se detecta en un osciloscopio en forma de señal. La fotografía 2.11 muestra el osciloscopio y la primer señal registrada del acelerador.



Fotografía 2.11. Osciloscopio.

### 2.3 Sistema de vacío

Hasta aquí hemos hablado de las componentes importantes del cañón de iones, así como de la línea del acelerador. Por último hablaremos de algo de suma importancia del acelerador: el sistema de vacío. Este sistema es de vital importancia para que dentro del acelerador se genere un vacío de entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  torr de presión. El haz de iones depende de parámetros de presión para poder subsistir. A presión atmosférica se necesitaría de muchísimos miles de volts para poder ionizar el gas dentro del cañón y poder producir un plasma. Además, se requiere el vacío para que cuando el haz de iones sea acelerado y enfocado, el camino libre medio sea mucho mayor que la distancia que hay entre el lugar donde se producen los iones y el sistema de detección.

El acelerador cuenta con cuatro bombas de vacío: dos mecánicas y dos bombas turbo moleculares.

La selección de la bomba de vacío que va a emplearse para un cierto proceso está definida por sus parámetros específicos, los cuales determinan sus propiedades. Los parámetros más importantes de los sistemas de vacío son: la presión más baja que puede lograr, el intervalo de presión, la velocidad de bombeo, la presión de descarga y el gas residual.

Por otra parte, la clasificación de las bombas de vacío se presenta en la figura 2.7 de acuerdo al intervalo de presión en el que trabajan.

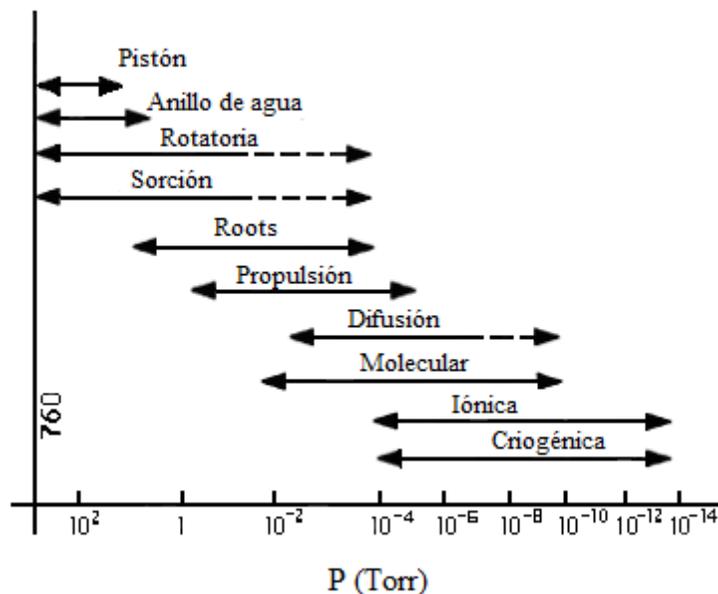


Figura 2.7. Rangos de presión para bomba de vacío.

Para lograr que en nuestro sistema se alcancen presiones de  $10^{-7}$  torr, se necesita en primer instancia una bomba mecánica que alcance un rango de presión de entre  $10^{-1}$  y  $10^{-3}$  torr, que es el intervalo que alcanzan las bombas mecánicas, para después con la ayuda de

otro tipo de bomba de vacío (turbomolecular) se alcance el rango de presión que se requiere dentro del sistema.

### 2.3.1 Bombas mecánicas<sup>[4]</sup>

El funcionamiento de la bomba de paletas rotatorias (bomba mecánica) es el siguiente: al girar el rotor provoca que las paletas se deslicen sobre las paredes del estator (con una presión uniforme debido al resorte que sostiene a las paletas), esto permite la entrada del gas entre el estator y el rotor. Después se mueve el volumen de gas contenido en esta región hasta la salida del estator. La figura 2.8 presenta esta operación en detalle.

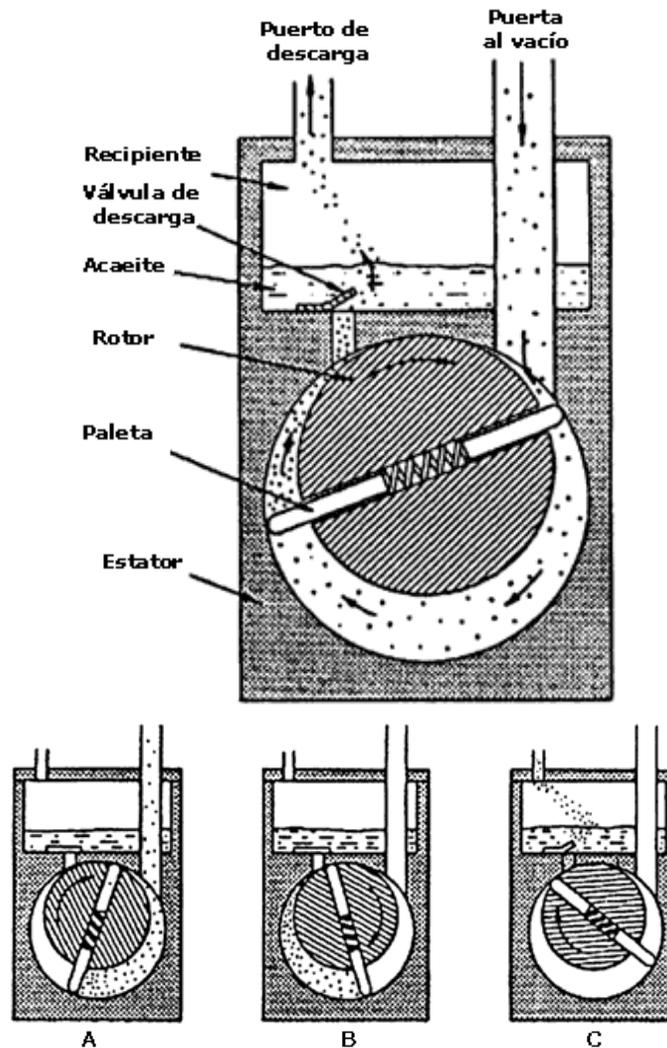


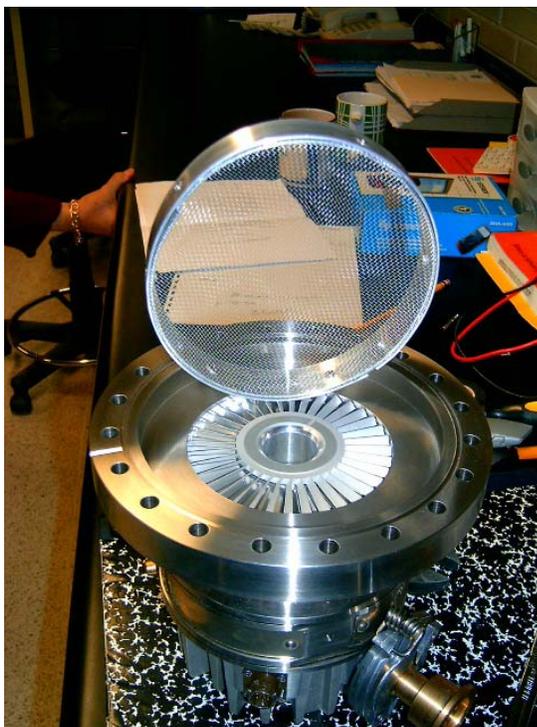
Figura 2.8. Bomba mecánica de paleta rotatoria en acción. A) Las paletas deslizantes se mueven cuando el rotor gira. El volumen entre la entrada y la paleta inferior es incrementado; esto causa que el gas se mueva dentro de esta área desde la entrada. B) El gas ha sido aislado del sistema de vacío y comienza a empujarse hacia la válvula de descarga. C) El gas se comprime ligeramente arriba de la presión atmosférica. La válvula de descarga se abre y el gas es expulsado fuera de la bomba a través del aceite en el recipiente.

Las bombas mecánicas utilizadas son de marca Alcatel modelo Pascal 2015 SD. Estas bombas tienen capacidad de hacer un vacío de hasta  $10^{-3}$  torr.

### 2.3.2 Bomba turbomolecular

Ahora bien, como vemos en la figura 2.6 el funcionamiento de las bombas turbomoleculares, está en el intervalo de  $10^{-2}$  hasta  $10^{-10}$  torr, dependiendo de su fabricación y de las especificaciones y modelos de cada bomba. En nuestro caso el fabricante nos dice que el intervalo de nuestras bombas es de  $10^{-3}$  hasta  $10^{-7}$  torr, tiene una velocidad de rotación de sus aspás de 56000 r.p.m, y una velocidad de bombeo de 280 litros por segundo. Como se aprecia en la figura 2.6, primero debemos hacer vacío con la bomba mecánica hasta alcanzar un vacío de  $10^{-3}$  torr. Una vez alcanzado este vacío se pone en operación la bomba turbo para llegar ahora si a la presión requerida por el sistema experimental. Las marca de la bomba turbo es Varian modelo TV-301 Navigator y tiene capacidad para hacer vacío hasta  $10^{-7}$  torr.

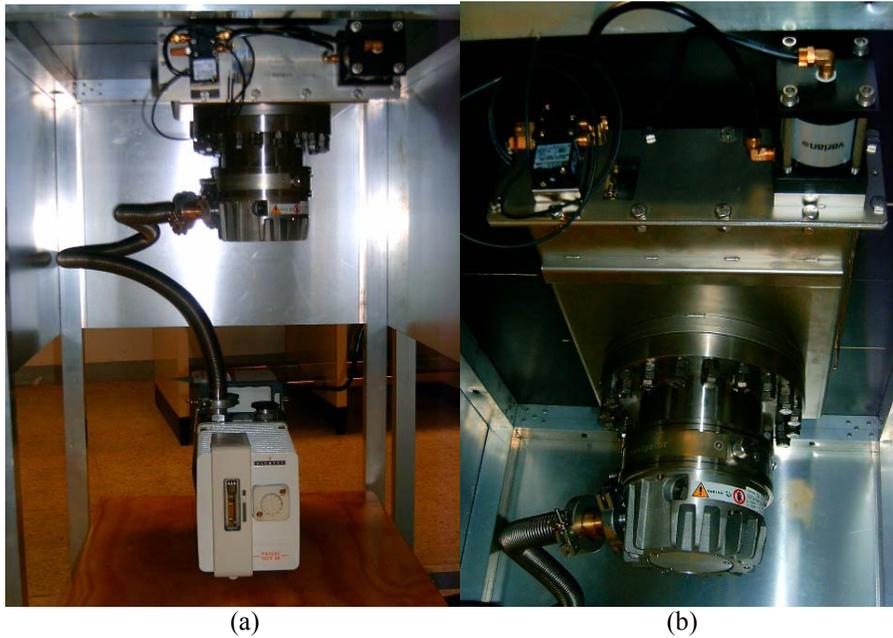
Una bomba turbomolecular está constituida por una turbina o motor con alabes o paletas que se mueven a velocidad supersónica (rotor) en la proximidad de alabes o paletas fijas (estator). La velocidad de rotación habitual es de unas 60.000 r.p.m. En la fotografía 2.12 se muestra la bomba turbo y se distinguen sus paletas o alabes, así como una protección (malla), que protege las paletas y evita que al caerse cualquier material hacia la bomba, entre a las paletas y la bomba quede inservible.



Fotografía 2.12. Bomba turbomolecular con protección (malla).

Principio de operación: todos sabemos que las moléculas de un gas tienen un movimiento al azar en todas direcciones, y que la dirección de las mismas se ve modificada durante los choques que ocurren entre ellas. El objetivo de los alabes rotantes de la turbina es modificar la trayectoria de las moléculas de gas, de modo de lograr un flujo macroscópico de las mismas en la dirección de bombeo (o sea, hacia afuera de la cámara de

vacío). En la fotografía 2.13 se observan las dos bombas de vacío (mecánica y turbomolecular) ya instaladas en el sistema experimental.



Fotografía 2.13. Bombas de vacío, (a) bomba mecánica (b) bomba turbomolecular.

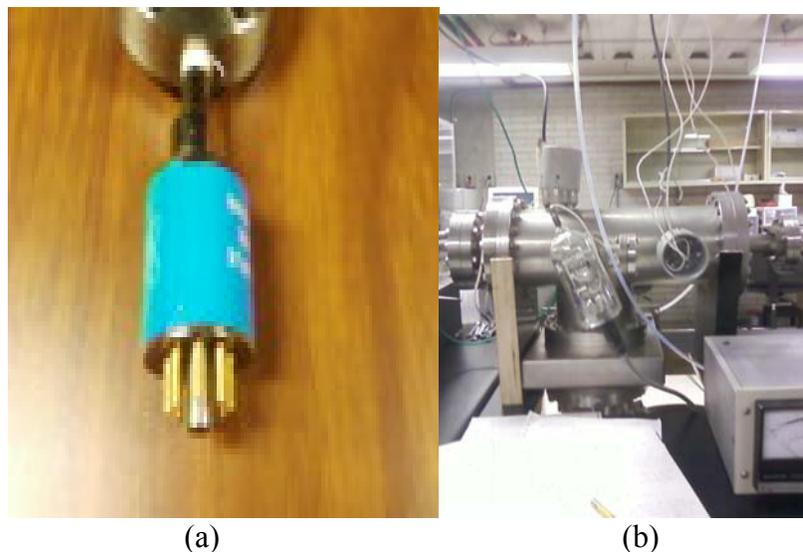
Dentro de este sistema de vacío se tiene una válvula electro neumática que está acoplada a cada una de las bombas turbomoleculares. Esta válvula es de seguridad ya que si el sistema eléctrico del laboratorio llegara a fallar, la válvula se cierra automáticamente al no haber electricidad y se abrirá cuando regrese, evitando que se pueda subir el aceite de la bomba mecánica. En la fotografía 2.14 se muestra la válvula electro neumática.



Fotografía 2.14. Válvula electro neumática.

### 2.3.3 Medidores de vacío <sup>[4]</sup>

Por ultimo para medir la presión del vacío dentro del sistema se cuentan con dos detectores distintos el primero llamado termopar que registra presiones  $10$  a  $10^{-3}$  torr. Este detector se encuentra en el inyector de los gases (donde se encuentra el receptor del cañón de iones), el segundo es un medidor por ionización de cátodo caliente y registra presiones a partir de  $10^{-3}$  hasta  $10^{-9}$  torr. Este último se encuentra en una de las entradas laterales del cañón de iones. En la fotografía 2.15 se muestran los dichos medidores.



Fotografía 2.15. (a) Medidor termopar. (b) medidor por ionización.

#### MEDICIÓN POR TERMOPAR (thermocouple).

La medición por termopar, consiste en una carcasa metálica que contiene un filamento de platino de unos cuantos ohmios de resistencia. El termopar es soldado a un puente de conducción en el centro del filamento proporcionando así, un medio para medir directamente la temperatura del puente. El filamento se calienta con una corriente constante. La resistencia de este alambre depende de manera lineal con la temperatura: a mayor temperatura, mayor oposición ejercen las moléculas del alambre al paso de los electrones libres que circulan a través de él. Debido a que la tensión aumenta también lo hace la temperatura, se reduce la señal del censor cuando aumenta la presión del sistema. Así en el extremo inferior del intervalo de presión del instrumento la señal del termopar esta al máximo, mientras que en el extremo superior del intervalo de presión produce una disminución en el termopar. Tiene un intervalo de operación de  $10$  a  $10^{-3}$  torr, El termopar da una pequeña señal continua tanto mas alta cuanto mas baja sea la presión en la cámara. Generalmente la temperatura a la que trabajan los filamentos de estos medidores, no exceden de  $300$  °C para evitar que posibles componentes que haya en el aire se carbonicen y se depositen en el filamento, alterando su calibración. En la figura 2.9 se muestra el esquema del termopar.

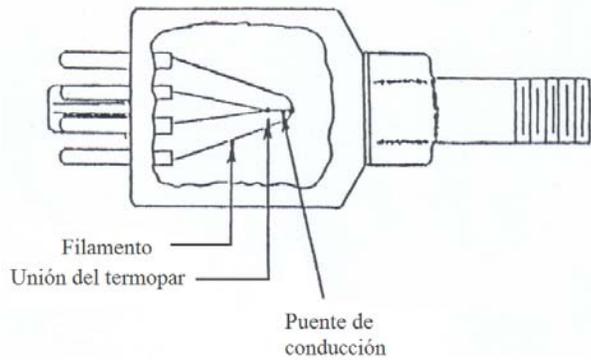


Figura 2.9. Medidor termopar

En la figura 2.10 se muestra un diagrama del sistema de vacío en sistema experimental.

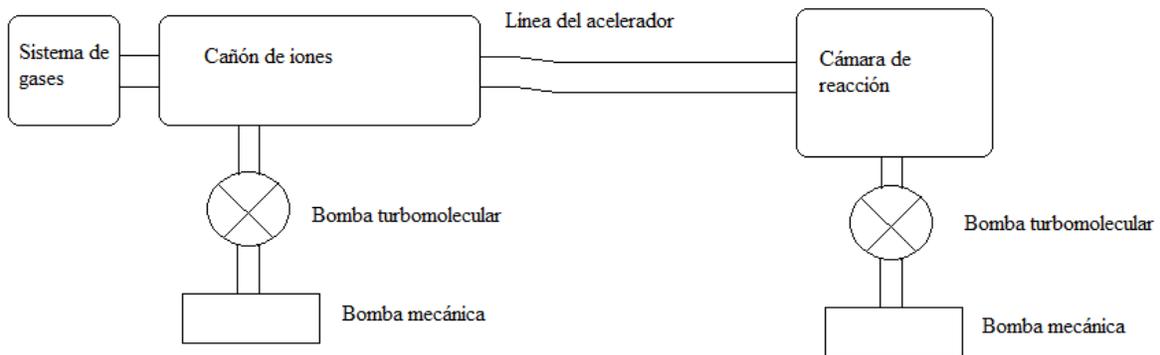


Figura 2.10. Diagrama de las bombas de vacío.

## MEDICIÓN POR IONIZACIÓN DE CÁTODO CALIENTE

El medidor por ionización de cátodo caliente consta básicamente de un filamento (cátodo), una rejilla y un colector (de iones). Su funcionamiento se puede explicar de la siguiente manera: cuando se hace pasar una corriente por el filamento, éste emite electrones que golpean la rejilla; la rejilla a su vez emite rayos X suaves, y estos rayos provocan la fotoemisión de electrones en el colector de iones. Este es un proceso que no depende de la presión (Figura 2.11).

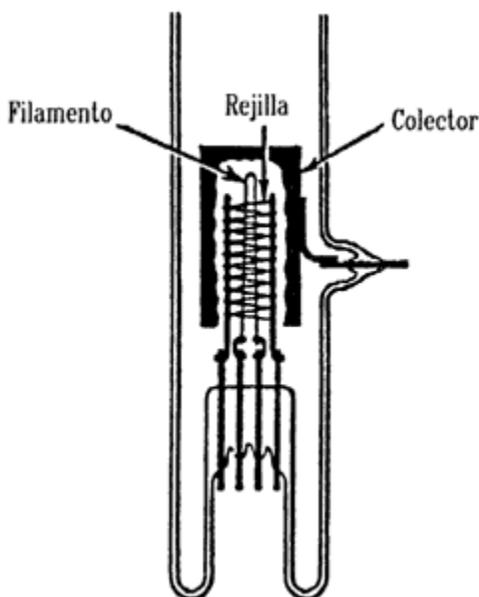


Figura 2.11. Medidor de cátodo caliente convencional.

En un gas de bajas presiones (menores de  $10^{-4}$  torr), el número de iones positivos producidos por el paso de una corriente de electrones es linealmente proporcional a la densidad de las moléculas del gas. Una medición en la corriente de iones es una medición de la presión a una temperatura dada.

El número de ionizaciones hechas por un electrón que pasa a través de un gas, depende del tipo de gas y de la energía cinética de los electrones. Por estudios de ionización en diferentes gases se sabe que la probabilidad mayor de ionización para casi todos los gases ocurre alrededor de los 150 volts, por esta razón, la energía de los electrones en un medidor de este tipo se fija en 150 volts.

Los medidores de ionización por cátodo caliente fabricados hasta 1950 podían medir valores de la presión de aproximadamente  $10^{-8}$  torr. En 1950 Bayard y Alpert hicieron una modificación en el medidor de ionización de cátodo caliente para poder medir presiones menores que  $10^{-8}$  torr. Ellos reemplazaron el colector cilíndrico de iones positivos por un alambre muy fino (0.01 mm) localizado dentro de la rejilla. Además, el filamento del

medidor Bayard-Alpert se coloca afuera de la estructura de la rejilla, en forma diferente al medidor de cátodo caliente. Este medidor se muestra en la figura 2.12.

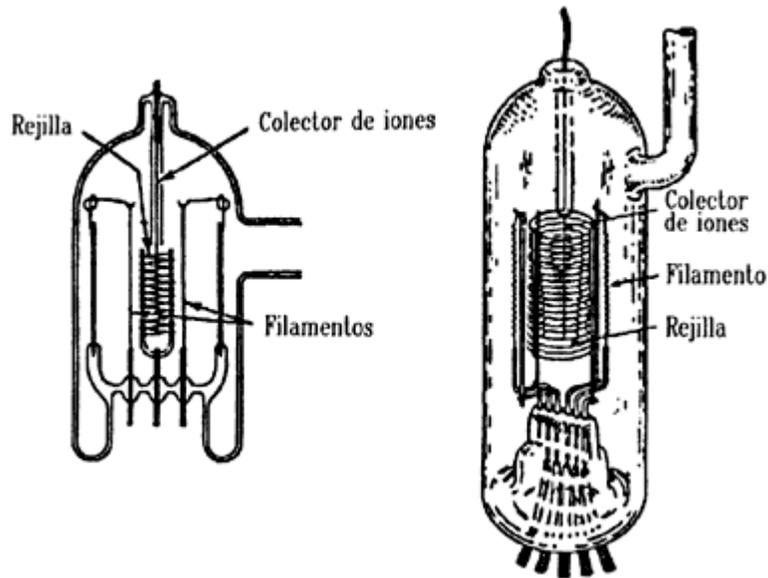


Figura 2.12. Modificación de Bayard y Alpert

En la figura 2.13 se muestra la escala de presiones para los dos medidores que se describieron.

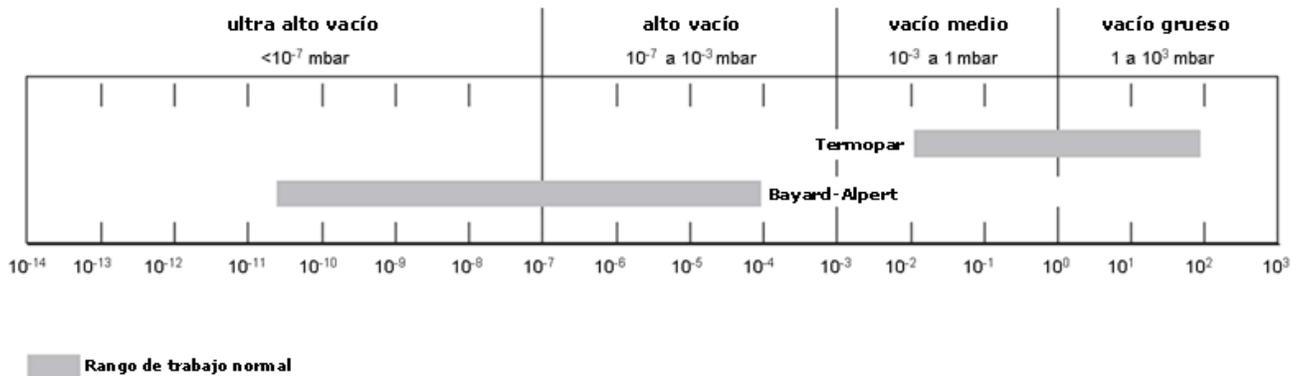


Figura 2.13. Intervalo de presiones de los medidores.

## **CAPÍTULO 3. REALIZACIÓN DE UN EXPERIMENTO.**

### **3.1 Funcionamiento del cañón de iones (generación del haz de iones)**

El equipo que se utilizó para la realización de este trabajo experimental no se había utilizado antes. El trabajo de tesis no fue solo la generación y detección de iones sino el armado, la construcción de piezas, la compra de componentes y muchas actividades que llevaron meses, y que no se ven reflejadas en lo que se está reportando. Una vez terminada la línea del acelerador se procedió a “limpiarla” con el sistema de vacío.

Se inicio el vacío con la bomba mecánica hasta llegar a un valor en el orden de  $10^{-3}$  torr e inmediatamente después de haber alcanzado esta presión se pone en funcionamiento la bomba turbomolucular hasta alcanzar un vacío de  $10^{-7}$  torr que es el intervalo de funcionamiento de la bomba turbo.

Este proceso de limpiado duró varias semanas en las cuales se estuvo haciendo vacío en todo el acelerador todo el día hasta llegar a la presión deseada. Se encontraron fugas por sellos (estos sellos son de cobre) que ya no sirvan esto quiere decir que el sello ya estaba dañado por la presión que ejercía el vacío y las propias bridas y también podría haber fugas por tornillos mal apretados. Una vez que se tenían los parámetros de presión se comenzó con el encendido del cañón de iones.

Como al inicio de la tesis, la finalidad de este trabajo es hacer funcionar el cañón de iones y obtener algunas corrientes del haz para ver tal funcionamiento. Se busca obtener parámetros para los cuales el cañón tenga un funcionamiento adecuado. Para ello se siguen los siguientes pasos:

- 1) Antes de poder generar el haz sabemos que debemos tener ciertas condiciones de presión. Como el sistema cuenta con válvulas electroneumáticas, las cuales se ponen a funcionar con aire a presión, el primer paso es verificar que haya aire en las tuberías del laboratorio. A continuación se encienden las bombas mecánicas se abren las válvulas y, hasta tener  $10^{-3}$  torr se encienden las bombas turbomoleculares. En caso de no llegar rápidamente a una presión de aproximadamente  $10^{-6}$  torr (aproximadamente 10 minutos) se procede a verificar que no haya fugas. Esto se hace con un poco de alcohol que se agrega a las uniones de las diferentes partes del acelerador así como en tornillos y se verifica en los medidores si hay o no un aumento en la presión.
- 2) El segundo paso es prender el sistema de refrigeración del cañón ya que la fuente genera una gran cantidad de calor. Este procedimiento es muy sencillo ya que sólo se prende el pequeño refrigerador que recircula el agua; aunque claro, también hay que esperar unos minutos para que enfrié el agua a una temperatura de entre 5 y 7 grados centígrados esto se ve en el medidor de temperatura del refrigerador que es un medidor digital con punta termopar.
- 3) Después de alcanzar la presión y una buena refrigeración dentro del cañón, el siguiente paso es desgasificar el filamento. Para ello se encienden las fuentes

eléctricas del ánodo y el cátodo (fuente de iones). La fuente del ánodo tiene dos escalas una para voltaje y otra para corriente. Primero se sube el voltaje poco a poco hasta 5 o 10 volts, después se empieza a subir el amperaje; esto se hace subiendo la escala gradualmente (subiendo 1 amperes por incremento, ya que es la primera vez que se desgasifica, después de varias veces de desgasificar el filamento el incremento en el amperaje puede ser de entre 2 ó 3 amperes), y se deja unos minutos mientras el filamento desgasifica y se limpia. En este punto aumenta la presión dentro del cañón, es por eso que se debe subir lentamente ya que si lo hacemos muy rápido, se corre el riesgo de que el filamento se rompa en primer lugar y en segundo que el vacío aumente demasiado y provoque un shock a las bombas turbomoleculares. Así que se espera a que el medidor de vacío indique una presión estable para repetir el procedimiento hasta llegar a un amperaje de entre 12 y 15 amperes máximo. A continuación se muestra una tabla de las medidas para la limpieza del filamento, teniendo como presión base en el acelerador  $4.8 \times 10^{-6}$  torr.

| Presión (Torr)       | Filamento |         | Tiempo     |
|----------------------|-----------|---------|------------|
|                      | Volts     | Amperes |            |
| $4 \times 10^{-6}$   | 0.5       | 3       | 7:50 a.m.  |
| $3.8 \times 10^{-6}$ | 1.5       | 4       | 8:30 a.m.  |
| $2.8 \times 10^{-6}$ | 2.0       | 5       | 9:20 a.m.  |
| $2.9 \times 10^{-6}$ | 2.5       | 6       | 10:00 a.m. |

Tabla 3.1. Medidas de desgasificación del filamento<sup>[11]</sup>.

Este procedimiento de desgasificación del filamento, se hizo en un lapso de entre dos y tres días. La tabla anterior son resultados del primer día en que se desgasificó el filamento el cuál duró todo el día desde aproximadamente las 8 de la mañana hasta las 6 de la tarde.

Cuando el filamento ya tiene el amperaje descrito anteriormente lo que prosigue es la inyección del gas en la fuente de iones. En nuestro caso tenemos una mezcla de argón y de hidrogeno, esta mezcla se fijó a un porcentaje aproximado de 30% argón y 70% hidrógeno. La mezcla es aproximada, se puso la misma presión en los reguladores de gas (80 psi) por lo que la presión en las válvulas de fuga variable era la misma y decimos que se aproximó por que con el medidor del termopar (que tiene unidades de millitorr y se fijo la mezcla en una escala de 0 a 100 millitorr), nos permitió aproximar la mezcla a lo que fue un 30 y un 70 por ciento. Cuando la mezcla de gas es introducida dentro del cañón el siguiente paso es encender la fuente de voltaje del cátodo. Se tiene una fuente con las mismas características que la fuente del filamento: dos escalas una de voltaje y otra de amperaje. En este caso, la aplicación de voltaje y amperaje es distinta que en la fuente del filamento. El amperaje que se le pone al cátodo es máximo de 1 ampere. Si se aumenta más de este valor podría hacer un corto circuito entre el filamento y el cátodo y las fuentes se podrían quemar y provocar un accidente. Mientras que el intervalo del voltaje está abierto para que se produzca la descarga entre los dos metales y el gas, y así se produzca el haz de iones.

- 4) El enfoque del haz se hace con las placas de deflexión vertical, las lentes Einzel y filtro el de velocidades que se describieron en el capítulo 2. Las placas de deflexión vertical están conectadas a una fuente de 10 volts que es el voltaje requerido para poder centrar el haz. Esta especificación la da el fabricante dentro del manual de cañón de iones<sup>[10]</sup>. Después el haz va en dirección hacia las lentes Einzel las cuales funcionan como unas lentes ópticas enfocando el haz. Por último, el haz pasa por el filtro de velocidades antes de salir del cañón. El equipo está dotado de una caja de control (fuente) con varias perillas por medio de las cuales se puede mover el haz de manera que pueda optimizarse.

Una vez que el haz ha salido del cañón de iones, pasa por el codo de  $10^\circ$  que está a la salida del cañón. Aquí se aplicó un voltaje positivo de entre 100 y 500 volts para poder desviar el haz. Recordemos que la finalidad del codo es hacer que las partículas que hayan salido del cañón como fotones por ejemplo, se estrellen con la placa y no sigan el recorrido del haz y así no afecten la detección del mismo. Ya desviado el haz, pasa a través de la línea del acelerador, llegando hasta la bandera, la cual, por medio de un atravesador, baja la placa de detección para que choque el haz con esta placa y sea detectado. En un principio el haz se detectó en un osciloscopio, y después para el trabajo de esta tesis se empleó un electrómetro para medir las corrientes.

### **3.2 Obtención de datos experimentales de prueba**

A lo largo de todo el trabajo de armado y construcción del acelerador, se fueron probando las diferentes partes. En el proceso se fueron solucionando los problemas que se presentaban. Ahora toca observar y registrar las corrientes eléctricas de los iones generados.

La información que se reporta a continuación, nos indica que el acelerador está funcionando: se genera, enfocan, aceleran y detectan haces positivos. Falta lo importante. Que es calibrar y optimizar todos los parámetros. Esta es la etapa a futuro que no corresponderá reportar en esta tesis.

Ya teniendo el haz de iones generado, el paso a seguir es que sea detectado en nuestra bandera. Para ello se variaron los parámetros de las fuentes a las que el cañón de iones está conectado. Se fijan los parámetros para los cuales el haz de iones es detectado. Claro está, que el haz puede ser detectado con muy poca energía para ciertos parámetros y con muy alta energía para otros parámetros. Se tendrán que hacer trabajos de caracterización posteriores para el cañón y así poder definir el haz con los parámetros que con los cuales el haz que caracterizado.

La primera vez que se detectó el haz, la señal se registró en el osciloscopio. Se fueron variando los parámetros de las fuentes (del imán, de las placas de deflexión vertical, de enfoque y aceleración y la de deflexión de  $10^\circ$ ) hasta poder ver la señal. También se varió la altura de la placa de la bandera con el tornillo de la misma, para saber si se detectaba todo el haz. Si se fija la altura en el camino que recorre el haz una sola vez, ya no tendría por qué variar esa altura y quedaría registrada por si se quisiera quitar la bandera. Variando los parámetros de las fuentes se obtuvieron los primeros datos del haz de iones para los

cuales el osciloscopio registró una señal de 100 mv y 100 ms. Estas mediciones se hicieron con un vacío de  $1.9 \times 10^{-5}$  torr de presión, y se muestran en la tabla 3.2 a continuación:

| Voltaje de aceleración (volts) $\pm 15v$ | Voltaje de enfoque (volts) $\pm 13.70v$ | Fuente ánodo      |                      | Fuente filamento |                     | Deflexión (volts) (codo de $10^\circ$ ) $\pm 25v$ |
|--|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---|
|  |   | Volts $\pm 2.28v$ | Amperes $\pm 0.009A$ | Volts $\pm 0.3v$ | Amperes $\pm 0.42A$ |   |
| 3000                                     | 2741                                    | 76                | 0.3                  | 10               | 14                  | 600   |

Tabla 3.2. Parámetros para la primera medición del haz de iones.

Las siguientes tablas muestran las demás mediciones que se hicieron con distintos valores de los parámetros y simplemente se vio la señal en el osciloscopio por que son datos de prueba para corroborar que el haz estuviera saliendo del cañón de iones y estuviera atravesando la línea del acelerador.

| Voltaje de aceleración (volts) $\pm 15v$ | Voltaje de enfoque (volts) $\pm 13.37v$ | Fuente ánodo      |                      | Fuente filamento |                     | Deflexión (volts) (codo de $10^\circ$ ) $\pm 25v$ |
|--|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---|
|  |   | Volts $\pm 2.28v$ | Amperes $\pm 0.009A$ | Volts $\pm 0.3v$ | Amperes $\pm 0.42A$ |   |
| 3000                                     | 2674                                    | 76                | 0.3                  | 10               | 14                  | 497   |

Tabla 3.3. Parámetros para la segunda medición del haz de iones.

| Voltaje de aceleración (volts) $\pm 15v$ | Voltaje de enfoque (volts) $\pm 11.77v$ | Fuente ánodo      |                      | Fuente filamento |                     | Deflexión (volts) (codo de $10^\circ$ ) $\pm 25v$ |
|--|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---|
|  |   | Volts $\pm 2.28v$ | Amperes $\pm 0.009A$ | Volts $\pm 0.3v$ | Amperes $\pm 0.42A$ |   |
| 3000                                     | 2355                                    | 76                | 0.3                  | 10               | 14                  | 320   |

Tabla 3.4. Parámetros para la tercera medición del haz de iones.

| Voltaje de aceleración (volts) $\pm 20v$ | Voltaje de enfoque (volts) $\pm 15.54v$ | Fuente ánodo      |                      | Fuente filamento |                     | Deflexión (volts) (codo de $10^\circ$ ) $\pm 25v$ |
|--|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---|
|  |   | Volts $\pm 2.28v$ | Amperes $\pm 0.009A$ | Volts $\pm 0.3v$ | Amperes $\pm 0.42A$ |   |
| 4000                                     | 3108                                    | 76                | 0.3                  | 10               | 14                  | 360   |

Tabla 3.5. Parámetros para la cuarta medición del haz de iones.

| Voltaje de aceleración (volts) $\pm 20v$ | Voltaje de enfoque (volts) $\pm 15.38v$ | Fuente ánodo      |                      | Fuente filamento |                     | Deflexión (volts) (codo de $10^\circ$ ) $\pm 25v$ |
|--|---|-------------------|----------------------|------------------|---------------------|---|
|  |   | Volts $\pm 2.28v$ | Amperes $\pm 0.009A$ | Volts $\pm 0.3v$ | Amperes $\pm 0.42A$ |   |
| 4000                                     | 3076                                    | 76                | 0.3                  | 10               | 14                  | 360   |

Tabla 3.6. Parámetros para la quinta medición del haz de iones.

NOTA: Las incertidumbres de las tablas, fueron tomadas de acuerdo al valor que el fabricante recomienda en el manual para cada una de las fuentes. En el anexo 1, que se encuentra al final de este capítulo, se menciona el porcentaje que el fabricante menciona para las fuentes utilizadas.

Las mediciones de las tablas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6, fueron realizadas solamente viendo lo que pasaba al mover las fuentes de aceleración y enfoque. En estas mediciones se pudo observar el haz de iones ajustando los parámetros de las fuentes hasta ver el haz de iones con la mayor intensidad posible. Es conveniente decir que estas mediciones fueron de prueba y error para poder observar el haz aclarando que faltaron parámetros de otras fuentes que no se tomaron en cuenta por la misma razón.

### 3.3 Cálculo de las masas de las partículas producidas en el cañón de iones por las corrientes obtenidas en el detector (bandera)

De la fuente de iones salen partículas que corresponden al gas ó gases introducidos en ella. Entre los contaminantes puede haber moléculas de agua o sus componentes, elementos o impurezas presentes en el filamento, elementos orgánicos el interior del acelerador por impurezas. Por lo tanto, consideramos interesante tratar de identificar las masas que se aceleran.

Para poder calcular las masas que se produjeron se puede despejar a B de la ecuación (2.2) que esta descrita en el capítulo 2:

$$E / B = (2qV_a/m)^{1/2} \quad \dots (3.1)$$

donde  $V_a$  es el voltaje de aceleración,  $m$  es la masa de la partícula que queremos saber,  $E$  el campo eléctrico,  $B$  el campo magnético y  $q$  la carga del electrón. De la ecuación (3.1) se puede despejar  $m$ :

$$m = 2qV_a \left( \frac{B}{E} \right)^2 \quad \dots (3.2)$$

El campo eléctrico  $E$  y el campo magnético  $B$ , no se pueden medir directamente, pero sus valores se pueden calcular a partir de los parámetros que nosotros podemos medir de las fuentes de voltaje del cañón.

Empleando la ecuación (2.4) del capítulo 2, donde  $I$  es la corriente aplicada a la bobina y  $k$  es la constante de proporcionalidad que depende del número de vueltas, de la constante de permeabilidad  $\mu_0$  y de la geometría de la bobina. En este caso el fabricante no proporciona los datos deseados de la bobina, pero sí proporciona la gráfica de campo magnético contra corriente para el cañón de iones modelo G-1. De está gráfica podemos obtener la constante  $k$  a partir de las curvas experimentales que se muestra a continuación:

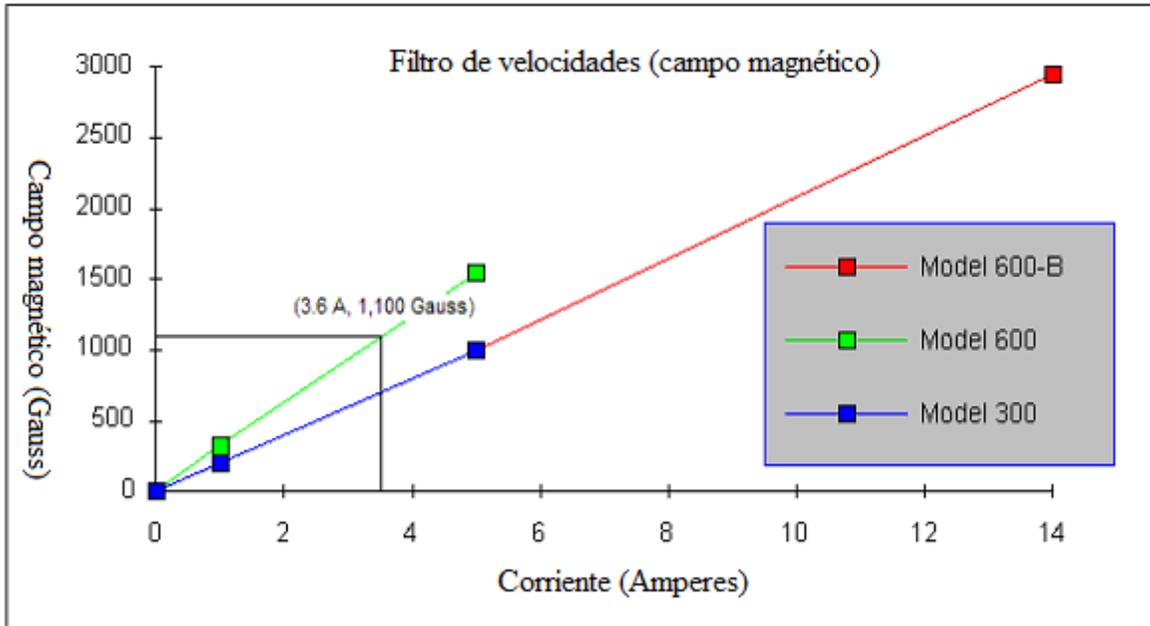


Figura 3.1. Gráfico del campo magnético en función de la corriente según el fabricante (Colutron Co.).

De la gráfica de la figura 3.1, se puede observar que para el modelo del cañón de iones G-1 se requiere una corriente de 3.6 amperes para que se produzca un campo magnético de 1100 Gauss, que es el valor máximo que se puede alcanzar para el modelo 600 del filtro de velocidades del cañón de iones G-1 (esto está descrito en el manual del fabricante). Se obtiene que el valor de la constante  $k$  es 305.5 Gauss / A. Al sustituir en la expresión (3.3) se obtiene:

$$B = (305.5 \text{ Gauss / A}) I \quad \dots (3.4)$$

Para obtener el campo eléctrico  $E$ , sabemos que el campo  $E$  entre dos placas paralelas y separadas por una distancia  $L$  está dado de la siguiente manera<sup>[10]</sup>:

$$E = \frac{V_F}{L} \quad \dots (3.5)$$

donde  $V_F$  es valor de la diferencia de potencial entre las placas del filtro de velocidades y  $L$  la separación de estas placas que para el modelo 600 del filtro es de  $L = 0.0178 \text{ m}$ . Sustituyendo el valor de  $L$  en la relación (3.5) se obtiene:

$$E = \frac{V_F}{0.0178\text{m}} \quad \dots (3.6)$$

Ya con los valores registrados en las fuentes de voltaje, podemos obtener los datos necesarios para el cálculo de las masas y así analizar los resultados.

Medición 1)

Voltaje de aceleración  $V_a = 3,000v \pm 15v$

Voltaje de enfoque (lentes Einzel)  $V_L = 2,442v \pm 12.21v$

Voltaje de deflexión (codo  $10^\circ$ )  $V_p = 432v \pm 25v$

Las corrientes tomadas con el electrómetro para los valores del filtro fueron las siguientes:

i) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 383.7v \pm 11.51v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$        | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (kg)*   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.07              | $0.12 \times 10^{-7}$ | $9.42 \times 10^{-30}$ | $1.34 \times 10^{-30}$ |
| 0.37              | $0.39 \times 10^{-8}$ | $2.63 \times 10^{-28}$ | $7.13 \times 10^{-30}$ |
| 0.58              | $0.39 \times 10^{-9}$ | $6.47 \times 10^{-28}$ | $1.11 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

ii) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 393.7v \pm 11.81v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$        | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.07              | $0.87 \times 10^{-8}$ | $8.95 \times 10^{-30}$ | $1.28 \times 10^{-30}$ |
| 0.38              | $0.39 \times 10^{-9}$ | $2.63 \times 10^{-29}$ | $6.95 \times 10^{-30}$ |
| 0.58              | $0.26 \times 10^{-9}$ | $6.14 \times 10^{-28}$ | $1.06 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

iii) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 403.8v \pm 12.11v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$        | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.08              | $0.84 \times 10^{-8}$ | $1.11 \times 10^{-29}$ | $1.39 \times 10^{-30}$ |
| 0.39              | $2.4 \times 10^{-9}$  | $2.64 \times 10^{-28}$ | $6.78 \times 10^{-30}$ |
| 0.77              | $0.13 \times 10^{-8}$ | $1.02 \times 10^{-27}$ | $1.34 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

Medición 2)

Voltaje de aceleración  $V_a = 4,000v \pm 20v$

Voltaje de enfoque (lentes Einzel)  $V_L = 3,000v \pm 15v$

Voltaje de deflexión (codo  $10^\circ$ )  $V_p = 498v \pm 25v$

Las corrientes tomadas con el electrómetro para los valores del filtro fueron las siguientes:

i) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 384.0v \pm 11.52v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$        | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.06              | $0.34 \times 10^{-7}$ | $9.21 \times 10^{-30}$ | $1.54 \times 10^{-30}$ |
| 0.33              | $0.13 \times 10^{-8}$ | $2.78 \times 10^{-28}$ | $8.47 \times 10^{-30}$ |
| 0.51              | $0.15 \times 10^{-8}$ | $6.66 \times 10^{-28}$ | $1.30 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

ii) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 394.0v \pm 11.82v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$        | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.04              | $0.01 \times 10^{-6}$ | $3.89 \times 10^{-30}$ | $9.75 \times 10^{-31}$ |
| 0.34              | $0.17 \times 10^{-6}$ | $2.81 \times 10^{-28}$ | $8.29 \times 10^{-30}$ |
| 0.52              | $0.86 \times 10^{-7}$ | $6.57 \times 10^{-28}$ | $1.26 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

iii) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 404.0v \pm 12.12v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$       | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.07              | $4.8 \times 10^{-6}$ | $1.13 \times 10^{-29}$ | $1.62 \times 10^{-30}$ |
| 0.34              | $1.5 \times 10^{-6}$ | $2.67 \times 10^{-28}$ | $7.88 \times 10^{-30}$ |
| 0.53              | $1.6 \times 10^{-7}$ | $6.49 \times 10^{-28}$ | $1.22 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

### Medición 3)

Voltaje de aceleración  $V_a = 5,000v \pm 25v$

Voltaje de enfoque (lentes Einzel)  $V_L = 3,911v \pm 19.55v$

Voltaje de deflexión (codo  $10^\circ$ )  $V_p = 774v \pm 25v$

Las corrientes tomadas con el electrómetro para los valores del filtro fueron las siguientes:

i) Voltaje filtro de velocidades  $V_F = 403.7v \pm 12.11v$

| $I \pm 0.005$ (A) | $I_H \pm 2\%*$       | Masa (Kg)              | $\pm \delta m$ (Kg)*   |
|-------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.07              | $5 \times 10^{-9}$   | $1.41 \times 10^{-29}$ | $2.03 \times 10^{-30}$ |
| 0.39              | $5 \times 10^{-8}$   | $4.40 \times 10^{-28}$ | $1.13 \times 10^{-29}$ |
| 0.58              | $0.4 \times 10^{-8}$ | $9.74 \times 10^{-28}$ | $1.68 \times 10^{-29}$ |

I: corriente en la bobina,  $I_H$ : intensidad del haz, m: masa calculada.

Estos resultados son importantes ya que aparte de la finalidad de probar el acelerador, estas mediciones volverán a repetirse en trabajos futuros conociendo entonces los parámetros que optimizan la producción del haz así como su detección.

### 3.4 Análisis de las mediciones

Ahora hablaremos del análisis de los datos obtenidos de las mediciones de las corrientes que se registraron en el cañón de iones, y así hacer también un análisis sobre las masas de las corrientes de los iones que se detectaron.

Si analizamos los resultados de las masas vemos que, por ejemplo, para  $H^+$  la masa calculada fue del orden de  $10^{-30}$  kg, con lo cual para  $H^+$  como solo tiene un protón, entonces la masa que debimos haber obtenido debería ser del orden de  $10^{-27}$  kg; análogamente para  $H_2^+$  y  $H_3^+$ . Estos resultados nos llevan a ver con detenimiento las corrientes que se aplicaron al imán ya que las corrientes registradas en el electrómetro son el resultado de la variación de esas corrientes.

Ahora bien si nos fijamos en la primera medida para la corriente del imán vemos que es muy pequeña en comparación a la segunda medida donde se registra la corriente en el electrómetro, este podría ser el primer indicio para ver que los datos tal vez están por debajo en algunas unidades que por muy pequeñas que sean pueden estar alterando los resultados que se calcularon para las masas. Una forma de saber la corriente es utilizando la ecuación (2.6) para poder calcularla y ver si es la correcta. Normalizando para  $H^+$ ,  $H_2^+$  y  $H_3^+$  la masa debe ser sustituida por 1, 2 y 3 respectivamente por lo que sustituyendo en la ecuación se obtiene

$$I_0 = K\sqrt{I} \quad \dots (3.7)$$

por lo que  $I_0 = K$ , ahora para  $H_2^+$  se obtiene que

$$I_1 = K\sqrt{2} \quad \dots(3.8)$$

pero  $I_0 = K$  por lo que se sustituye en la ecuación (3.8) y se hace el mismo paso para  $H_3^+$

$$I_1 = I_0\sqrt{2} \quad \dots(3.9)$$

$$I_2 = I_0\sqrt{3} \quad \dots(3.10)$$

Ahora, con las ecuaciones (3.9) y (3.10) podemos ver a qué corriente deberían estar los picos para  $H_2^+$  y para  $H_3^+$  suponiendo que la primera corriente de la medición es correcta. Entonces sustituyendo se obtiene que las corrientes deberían ser de 0.09A para  $H_2^+$  y de 0.12A para  $H_3^+$  pero experimentalmente se obtuvo una corriente para  $H_2^+$  de 0.37A y de 0.58 para  $H_3^+$ .

Por lo que los resultados obtenidos experimentalmente hacen ver que la precisión con la que fueron tomados los datos no fue la correcta, ya que para todas las mediciones se obtienen aproximadamente los mismos valores de las corrientes.

Si bien el experimento no resultó como se esperaba, por lo menos sugiere una buena tendencia del proyecto de este trabajo, ya que el objetivo principal es que el acelerador quede funcionando y que al probarlo por primera vez, se obtuvieran datos para ver su buen funcionamiento. Cabe recordar que estas medidas fueron tomadas sin optimizar el sistema, fueron medidas hechas por primera vez. Por lo tanto, vemos que el resultado no era lo que se esperaba y que aun hay varios problemas que resolver. Sin embargo, se probó que todo el equipo funciona. Si se detectaron y distinguieron varias masas que sospechamos corresponden a  $H^+$ ,  $H_2^+$  y  $H_3^+$ . Solo habrá que optimizar los parámetros.

## **CAPÍTULO 4 TRABAJOS A FUTURO DEL ACELERADOR Y CONCLUSIONES**

### **4.1 Trabajo a futuro.**

Si bien la contribución de la tesis fue de aportar una prueba para medir corrientes y ver si el cañón de iones modelo G-1 tenía un buen funcionamiento, hay muchas variables que optimizar dentro de este pequeño acelerador. La siguiente etapa, es encontrar la optimización del cañón de iones haciendo casi el mismo procedimiento de este trabajo de tesis, para lograr la optimización de las lentes Einzel y del haz de iones.

Una vez terminada la optimización del cañón se empezará con el proyecto propuesto para el acelerador. Este experimento tiene lugar en el campo de la Física Atómica y Molecular, y se llama “Disociación de las moléculas de CO y CO<sub>2</sub>”, el cual requiere de la optimización del cañón, ya que los parámetros del haz de iones y de las lentes Einzel deben ya estar fijos al iniciar con la investigación.

También se planea a futuro una extensión del acelerador, que consiste en agregar una o dos líneas al acelerador para tener más opciones para trabajos de investigación diferentes.

### **4.2 Conclusiones.**

De las pruebas de este trabajo, se concluye que el cañón de iones modelo G-1 funciona en excelentes condiciones con los parámetros que se ajustaron de las fuentes, que serán de utilidad para que sistema sea optimizado. También cabe aclarar que no se utilizó toda la energía que se puede adquirir del cañón, ya que solo se llegó a utilizar un voltaje en la fuente de aceleración de entre 3000 y 5000 volts utilizando un intervalo de energía de 0 a 5 kev, mientras que en la fuente de enfoque (lentes Einzel), se utilizó un voltaje de entre 2442 y 3911 volts utilizando un intervalo de energía de 0 a 4 kev, esto fue por que no se tenían condiciones optimas para poder llegar a una energía mayor a los 5 kev.

Por lo que en la optimización del sistema se deberá utilizar la energía restante para llevar a cabo una buena optimización para el sistema experimental, o en su defecto hacer pruebas como la de este trabajo para tener idea de cómo se comporta el sistema en el intervalo de los 0 a los 10 kev de energía.

Cuando se tomaron los datos de las corrientes y se calcularon las masas de los iones detectados, las masas calculadas estuvieron entre dos y tres ordenes de magnitud por encima del orden de magnitud que correspondería a las masas de H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, y H<sub>3</sub><sup>+</sup> que es del orden de 10<sup>-27</sup> kg. Por lo que se tendrá que mejorar los parámetros del cañón basados en los resultados de esta tesis.

### 3.5 ANEXO 1\*

#### CÁLCULO DE INCERTIDUMBRES

Para calcular las incertidumbres de las masas, se utiliza el método general para funciones de dos o más variables<sup>[5]</sup>. Utilizando la ecuación (3.2), sustituyendo a B y E de las ecuaciones (3.3) y (3.5) respectivamente dando como resultado la siguiente ecuación:

$$m = 2qV_a \left( \frac{kI}{V_F/L} \right)^2 \quad \dots(A.1)$$

Ahora usando el método general de dos o mas variables hacemos un cálculo diferencial sobre la ecuación (A.1) ya que esta ecuación tiene mas de dos variables y la masa calculada queda en función de esas variables donde  $m = f(V_a, I, V_F)$

$$\delta m = \frac{2qk^2 d^2 I^2}{V_F^2} \delta V_a + 4qk^2 d^2 \frac{V_a I}{V_F^2} \delta I - 4qk^2 d^2 \frac{V_a I^2}{V_F^2} \delta V_F \quad \dots(A.2)$$

Si hacemos el análisis de la ecuación (A.2) vemos que cuando se hace la medición los parámetros del voltaje de aceleración  $V_a$  y el voltaje del filtro de velocidades  $V_F$  permanecen constantes ya que no hay variaciones mas que de la corriente del imán, por lo que la ecuación (A.2) se reduce a un solo término el de en medio que es el que depende solamente de la incertidumbre de la corriente por lo que se obtiene

$$\delta m = 4qk^2 d^2 \frac{V_a I}{V_F^2} \delta I \quad \dots(A.3)$$

por lo que la ecuación (A.3) es la utilizada para el cálculo de las incertidumbres de las masas.

Para las incertidumbres de las fuentes se revisó el manual de cada una de las fuentes así que la incertidumbre asociada a la lectura de cada medición está dada por el fabricante y se muestra a continuación:

- a) Voltaje de aceleración y voltaje de las lentes (lentes Einzel), el fabricante da un  $\pm 0.5\%$  de la lectura de la medición.
- b) Voltaje del filtro de velocidades  $V_F$ , el fabricante da un  $\pm 3\%$  del valor de la medición.
- c) Corriente del electrómetro  $I_H$ , el fabricante proporciona un  $\pm 2\%$  del valor de la medición.
- d) Fuente del ánodo y filamento, el fabricante proporciona un  $\pm 3\%$  del valor de cada

Para dos fuentes se uso el método de la mínima escala ya que el manual del fabricante no proporciona la incertidumbre asociada. Estas fuentes son las del imán del filtro de velocidades que se le asocia una incertidumbre de  $\pm 0.005$  amperes y la fuente del voltaje de deflexión (codo  $10^\circ$ ) esta fuente tiene una escala en kv y cada raya de la escala mide 0.5 kv por lo que tomando la mínima escala la incertidumbre que de de  $\pm 25$  volts.

A continuación se muestran las incertidumbres de las mediciones de las corrientes en el electrómetro.

| Medición 1 |                                      | Medición 2 |                                      | Medición 3 |                                      |
|------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|--------------------------------------|
| i)         | $\pm 2.88 \times 10^{-18} \text{ A}$ | i)         | $\pm 2.31 \times 10^{-17} \text{ A}$ | i)         | $\pm 5.00 \times 10^{-19} \text{ A}$ |
|            | $\pm 3.04 \times 10^{-19} \text{ A}$ |            | $\pm 3.38 \times 10^{-20} \text{ A}$ |            | $\pm 5.00 \times 10^{-17} \text{ A}$ |
|            | $\pm 3.04 \times 10^{-21} \text{ A}$ |            | $\pm 4.50 \times 10^{-20} \text{ A}$ |            | $\pm 3.20 \times 10^{-19} \text{ A}$ |
| ii)        | $\pm 1.51 \times 10^{-18} \text{ A}$ | ii)        | $\pm 2.00 \times 10^{-18} \text{ A}$ |            |                                      |
|            | $\pm 3.04 \times 10^{-21} \text{ A}$ |            | $\pm 5.78 \times 10^{-16} \text{ A}$ |            |                                      |
|            | $\pm 1.35 \times 10^{-21} \text{ A}$ |            | $\pm 1.47 \times 10^{-16} \text{ A}$ |            |                                      |
| iii)       | $\pm 1.41 \times 10^{-18} \text{ A}$ | iii)       | $\pm 4.60 \times 10^{-13} \text{ A}$ |            |                                      |
|            | $\pm 1.15 \times 10^{-19} \text{ A}$ |            | $\pm 4.50 \times 10^{-14} \text{ A}$ |            |                                      |
|            | $\pm 3.38 \times 10^{-20} \text{ A}$ |            | $\pm 5.12 \times 10^{-16} \text{ A}$ |            |                                      |

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Hlawiczka, Introducción a la electrónica cuántica, Reverte 1977.
- [2] Forrest I. Boley, Plasmas en el laboratorio y en el cosmos, Reverte 1968.
- [3] P. Corona, Calibración de un cañón de iones de baja energía, Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias UNAM, 2007.
- [4] L. Talavera y M. Farías, El vacío y sus aplicaciones, Fondo de Cultura Económica 1995.
- [5] D. C Baird, Experimentación una introducción a al teoría de mediciones y al diseño de experimentos, Pearson Educación, 1991.
- [6] A. V. Engel, Ionizad Gases, American Institute of Physics 1994.
- [7] J. L. Delcroix, Introducción a la teoría de los gases ionizados, Alhambra 1968.
- [8] R. J. Goldston y P. H. Rutherford, Introduction to plasmas physics, Taylor and Francis Group 2000.
- [9] R. A. Cairns, Plasma physics, Blackie 1985.
- [10] Colutron Research Corporation, Manual del cañón de iones modelo G – 1, 1995.
- [11] Bitácora del laboratorio de colisiones, Facultad de Ciencias, UNAM. (Febrero 28 de 2008)
- [12] L. Artsimovich y S. Lukianov. Movimiento de las partículas cargadas en campos eléctricos y magnéticos. Mir, Moscu, URSS (1974)