

## Diseño, construcción y operación de un acelerador de iones a energías de keV

L. Gutiérrez, J. de Urquijo, C. Cisneros e I. Alvarez

*Laboratorio de Cuernavaca, Instituto de Física,  
Universidad Nacional Autónoma de México, apartado postal 139-B,  
62191 Cuernavaca, Morelos*

(recibido el 15 de octubre de 1987; aceptado el 2 de febrero de 1988)

**Resumen.** Se ha diseñado y construido un acelerador en el intervalo de energía de 0.5 a 5.0 keV para realizar investigaciones en el campo de la Física Atómica y Molecular. Se presenta una descripción de sus partes básicas y de la instrumentación electrónica asociada. Se describe su funcionamiento y se presentan resultados preliminares sobre la producción de  $H^+$ ,  $H_2^+$  y  $H_3^+$  como función de los parámetros que gobiernan su producción.

PACS: 06.90.+v

### 1. Introducción

Los aceleradores de iones son aparatos ampliamente utilizados en investigación en la Física de Colisiones Atómicas y Moleculares. En ellos es posible producir iones e impartirles energía traslacional controlable. Las características específicas de cada acelerador de iones dependen de los experimentos a que están destinados [1], aunque es posible identificar algunas partes comunes a estos aparatos: a saber, el sistema de vacío, cuyo fin es mantener la identidad de los iones producidos y acelerados hasta llegar a la cámara de colisión, y que las partículas resultantes de la reacción lleguen a la región de detección; la fuente de iones, que es el elemento productor de las partículas cargadas, atómicas o moleculares, que servirán como proyectiles; el sistema de enfoque, consistente en lentes electrostáticas que confinan al haz de iones alrededor de un eje evitando que se disperse por todo el volumen de las cámaras que lo contienen; el sistema de selección de masas, que separa de la mezcla de iones a un sólo tipo de éstos; y por último, el sistema de detección que cuantifique al proceso que se desea medir, del cual se obtiene información cualitativa y cuantitativa acerca del proceso bajo estudio.

En este trabajo se presenta el diseño, construcción y operación de un acelerador de iones a energías comprendidas entre 0.5 y 5.0 keV, y se reporta la producción de  $H^+$ ,  $H_2^+$  y  $H_3^+$  en este intervalo de energías.

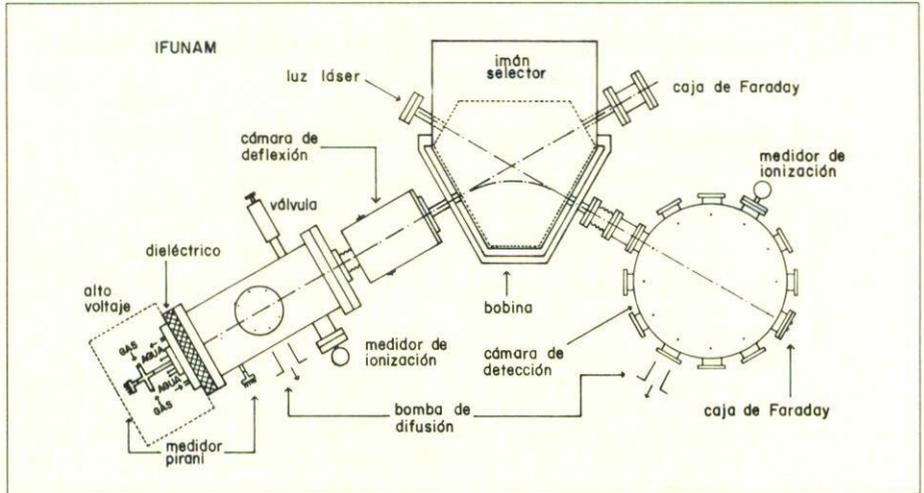


FIGURA 1. Diagrama del acelerador de iones. Intervalo de energía: 0.5 a 5.0 keV.

## 2. Descripción técnica del acelerador de iones

En la figura 1 se muestra un esquema del acelerador en su conjunto, y en la figura 2 se presenta la instrumentación electrónica asociada a las diversas partes que lo componen. Ambas figuras complementan la descripción de los detalles técnicos de este aparato.

En la figura 1 se muestra la cámara que aloja a la fuente de iones y a la lente de enfoque, cuyo detalle se describe en la figura 2. En esta sección, los iones son producidos, acelerados y enfocados. Junto a dicha cámara se muestran los tubos para la admisión de gases, la entrada y salida de agua para fines de refrigeración, y una brida de material dieléctrico que aísla la parte de alto voltaje del resto del aparato, el cual se conecta al potencial de tierra. Debido a que las conexiones de agua y gas se encuentran en la zona de alto voltaje, fue necesario usar mangueras de material aislante para hacer las conexiones a sus respectivos depósitos. Para los gases se empleó manguera de teflón, químicamente inerte, con una presión de vapor de aproximadamente  $10^{-6}$  torr a temperatura ambiente; para el agua fue suficiente usar manguera de nylon. Como se puede observar en la figura 2, el recinto por el que circula el agua cubre a la fuente de iones, y la aísla térmicamente del resto del acelerador, ya que el filamento de la fuente de iones alcanza temperaturas de varios cientos de grados centígrados; de no existir esta refrigeración, se quemarían algunos sellos entre bridas y se calentaría toda la estructura. Otra razón importante para mantener dicho enfriamiento, es que una contribución a la pérdida de iones dentro de la fuente se debe a la neutralización de estos con la pared. Más aún, el coeficiente de recombinación con la superficie

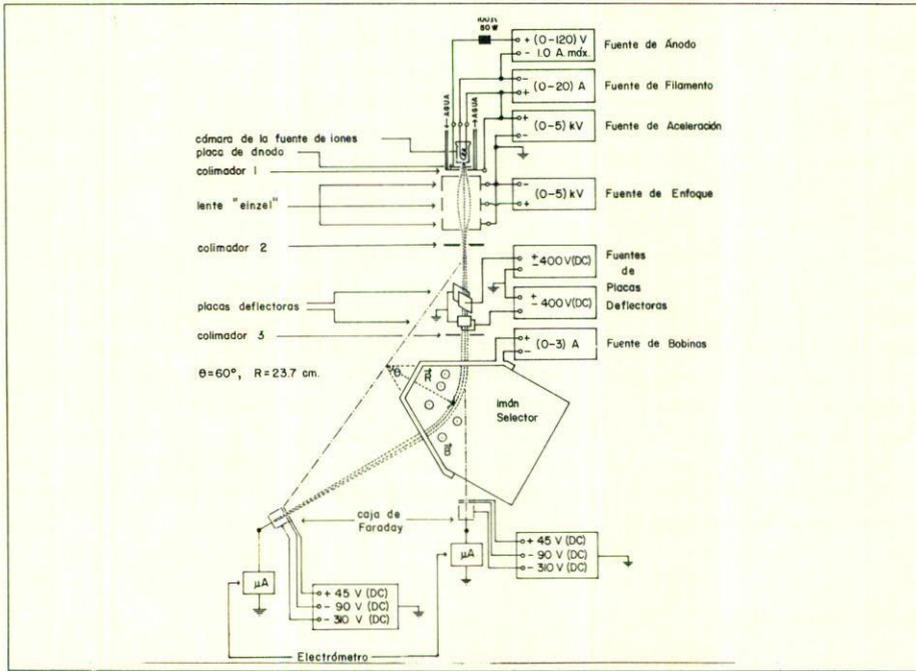


FIGURA 2. Descripción de la instrumentación electrónica asociada al acelerador.

aumenta con la temperatura del material [2]. En forma complementaria al sistema de enfriamiento por agua se adaptó un ventilador (no se muestra) dirigido hacia las conexiones de agua para contribuir a enfriar las bridas.

En la figura 1, la cámara denominada de "deflexión" contiene cuatro placas de cobre, paralelas dos a dos: un par para deflexión vertical de las partículas cargadas y el otro para su deflexión horizontal. Este conjunto de placas permite corregir la trayectoria del haz de partículas debido a posibles desviaciones, y a compensar el efecto de borde del imán, ya que la inducción magnética,  $B$ , actúa sobre el haz antes de que éste entre o salga de los polos del imán; en su interior,  $B$ , es uniforme.

En este acelerador se usó un espectrómetro de masas magnético que separa a los iones por su cantidad de movimiento [3], con la propiedad de que todas las partículas con carga  $e$  que tienen la misma velocidad y masa las enfoca a su salida en una pequeña región bien definida [4] (Fig. 2). La cámara donde ocurre la separación de los iones tiene cuatro bocas con el propósito de poner en interacción colineal haces de partículas o bien un haz de partículas y radiación láser (Fig. 1).

La última cámara que aparece en la figura 1 aloja una caja de Faraday para medir la corriente de iones. A excepción de la cámara donde ocurre la separación de los iones, que es de aluminio, el resto, junto con la tubería que las une son de acero inoxidable, no magnético, tipo 304. Los sellos entre bridas de acero inoxidable son tipo conflat con sello de aluminio, y los sellos entre bridas de diferente material son arosellos de vitón, como en el ubicado en la brida de material dieléctrico (Fig. 1), así como los sellos entre las bridas de las bombas difusoras, que son de acero inoxidable y aluminio.

El vacío se produce en dos zonas del acelerador. En la región de la cámara de la fuente de iones y lente "einzel" se cuenta con una bomba de difusión de aceite con velocidad de bombeo de 500 l/s, apoyada por una bomba rotatoria. La otra zona donde se hace vacío es la cámara de detección, donde se cuenta con un sistema similar, con una velocidad de bombeo de 300 l/s. Todo el sistema de vacío se opera desde un tablero de control con protección contra fallas en el suministro eléctrico y en el sistema de refrigeración. La presión con valores en el intervalo de 760 a  $10^{-3}$  torr se registra con medidores pirani, y para valores menores con medidores de ionización. La mayoría de los atravesadores eléctricos de atmósfera a vacío son de cerámica.

### 3. Fuente de iones

Si bien el acelerador está diseñado para usar fuentes de iones diversas, actualmente se cuenta con una que los produce por descarga en arco a baja presión de gas [3] ( $\sim 10^{-1}$  torr). La cámara de la fuente de iones es de nitrato de boro y en su interior tiene un filamento (cátodo) de tungsteno como emisor de electrones, los que son acelerados hacia la placa de ánodo, ionizando el gas previamente admitido que se encuentra en el medio. Tanto los iones producidos por colisión electrón-neutro, como los electrones primarios, constituyen un sistema cuasineutro: el plasma de la descarga en arco; esta descarga se crea cuando circula una corriente eléctrica a través de la mezcla gaseosa, denominada "corriente de descarga", la cual alcanza valores cercanos a 1 A. Los iones positivos se extraen directamente de la frontera plasma-ánodo al aplicar un pequeño voltaje de extracción (menor que 120 volts) entre el ánodo y el colimador 1 (Figs. 2 y 3).

### 4. Región de aceleración

Los iones extraídos de la fuente son acelerados a la energía deseada en la región comprendida entre el colimador 1, donde está conectado el voltaje de aceleración ( $V_{ac}$ ), y el primer electrodo de la lente "einzel". Cabe notar que los iones reciben una pequeña aceleración desde la placa de ánodo debido al voltaje de extracción, de tal manera que al voltaje de aceleración debe sumársele el de extracción (Fig. 2).

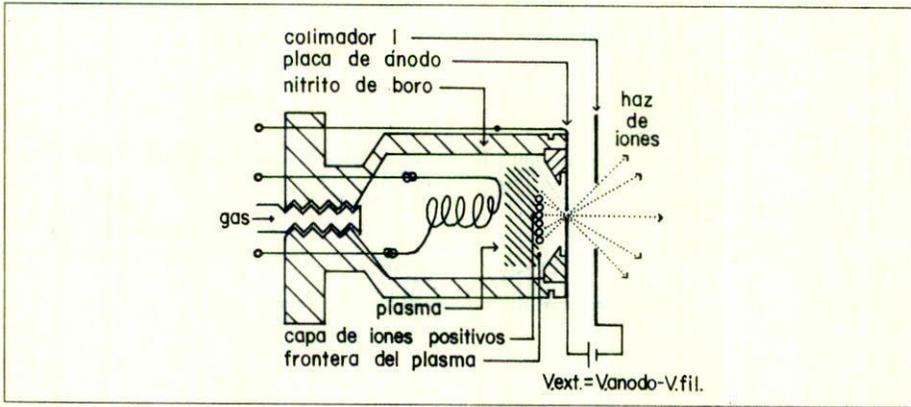


FIGURA 3. Fuentes de iones.

### 5. Lente "einzel"

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 [4]. 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 [5]. La figura 4 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 al acelerador es de acero inoxidable, con un diámetro interior de 4.5 cm, longitud de 13.9 cm y está soportada entre la brida de material dieléctrico (Fig. 1) y el colimador 2 (Fig. 2). Dada la geometría del aparato, se requiere que la lente "einzel" enfoque los iones a 30.0 cm de la placa de ánodo, lo cual se consigue con el valor [3]  $U_2/U_1 = 0.160$ , y de acuerdo con la convención establecida para medir los voltajes en lentes electrostáticas (en el caso actual el voltaje de cátodo), se tiene que  $U_1 = V_{ac}$  (Fig. 2) y  $U_2 = V_{ac} - V_e$ , donde  $V_e$  es el voltaje de enfoque al que hay que conectar el segundo electrodo y  $V_{ac}$  el voltaje de aceleración, así que  $V_e = 0.84V_{ac}$ . Como se ve,  $V_e$  es siempre una fracción del voltaje de aceleración; manteniendo esta fracción constante para

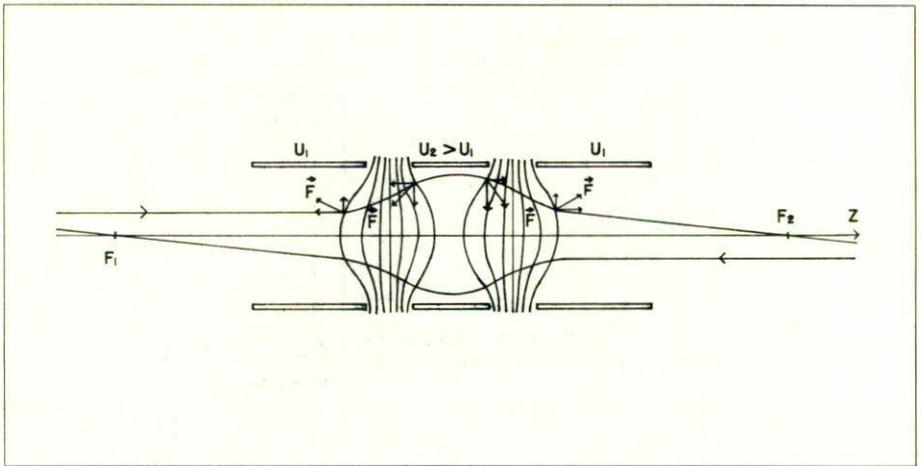


FIGURA 4. Ilustración de las propiedades de enfoque de una lente "einzel".

diferentes voltajes de aceleración, la lente "einzel" mantendrá el foco en el mismo punto.

## 6. Imán selector

Entre las superficies polares se produce una inducción magnética uniforme  $\mathbf{B}$ , que defleca continuamente los iones positivos a un ángulo de  $60^\circ$ , en un arco de círculo cuyo radio  $R$  es 23.7 cm (Fig. 5). Como se ilustra en la figura 2, el objeto, el vértice del imán y la imagen, están sobre una línea recta (ley de Barber [6]), lo que fija las longitudes para la tubería que une las cámaras a vacío. Como se dijo anteriormente, las líneas de inducción magnética saldrán de las superficies polares debido al efecto de borde, y la fuerza magnética producida desviará a los iones a la entrada y a la salida. Una forma práctica de resolver este problema fue colocar antes de la entrada del imán un par de placas paralelas para deflexión vertical y otro más para deflexión horizontal; de esta manera al aplicarles un voltaje variable respecto a tierra se consigue compensar este efecto, pudiéndose además corregir posibles desviaciones del haz (Fig. 2). Para calibrar el espectrómetro, la intensidad de inducción magnética,  $B$ , se midió en la parte central del entrehierro utilizando una sonda plana de efecto Hall y se usó la fórmula [6]:

$$B = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2mV_{ac}}{e}} \quad [\text{T}], \quad (1)$$

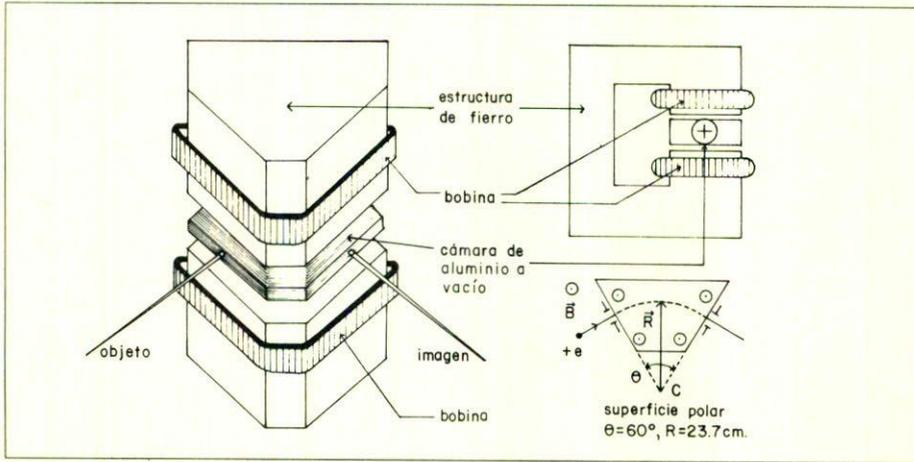


FIGURA 5. Electroimán. Diferentes aspectos del mismo.

donde  $m$  y  $e$  son la masa y la carga del ion que se desea deflectar,  $V_{ac}$  es el voltaje de aceleración y  $R$  el radio del arco de círculo que describirá el ion, todo en unidades SI. Los iones hidrogénicos  $H^+$ ,  $H_2^+$ , y  $H_3^+$  se detectaron con una desviación de  $\pm 10$  gauss con respecto al valor teórico, ello debido probablemente al fenómeno de histéresis en el imán. La familia de curvas de la figura 6 resume los cálculos de intensidad de inducción magnética (Ec. 1) necesaria para deflectar del colimador de entrada al colimador de salida del electroimán, a un ion con masa desde 1 hasta 20 uma y para energías desde 0.5 keV hasta 5.0 keV en incrementos de 0.5 keV.

## 7. Caja de Faraday

La caja de Faraday [7] (Fig. 7), situada aproximadamente en el foco del espectrómetro (Fig. 2), consiste de cuatro electrodos de cobre, 2 a 5, a los que se les aplica diferentes voltajes (DC) fijos respecto a tierra, y un electrodo de acero inoxidable conectado a tierra, el cual cubre a los otros (Fig. 7). El haz de iones que se hace incidir en la caja de Faraday encuentra primero al electrodo conectado a tierra, en seguida el electrodo 2 polarizado con +45 V, cuya función es evitar que ingresen partículas cargadas lentas que forman el gas residual dentro de las cámaras a vacío. El electrodo 3, polarizado con -90 V evita que los electrones secundarios salgan de la caja de Faraday. En seguida, un cilindro polarizado con -310 V (electrodo 4) tiene como función regresar al colector (electrodo 5) todos los electrones secundarios. En el colector es donde ocurre la emisión de electrones secundarios, que al ser regresados a éste, el efecto neto es que el electrómetro cuenta un sólo electrón por cada ion positivo que colisiona con el colector. Es claro que además de los electrones secundarios hay retrodispersión de iones positivos

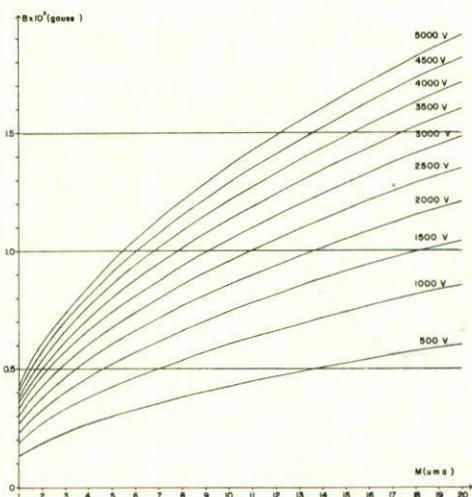


FIGURA 6. Curvas de calibración del electroimán. Intensidad de inducción magnética en función de la masa atómica para diferentes voltajes de aceleración.

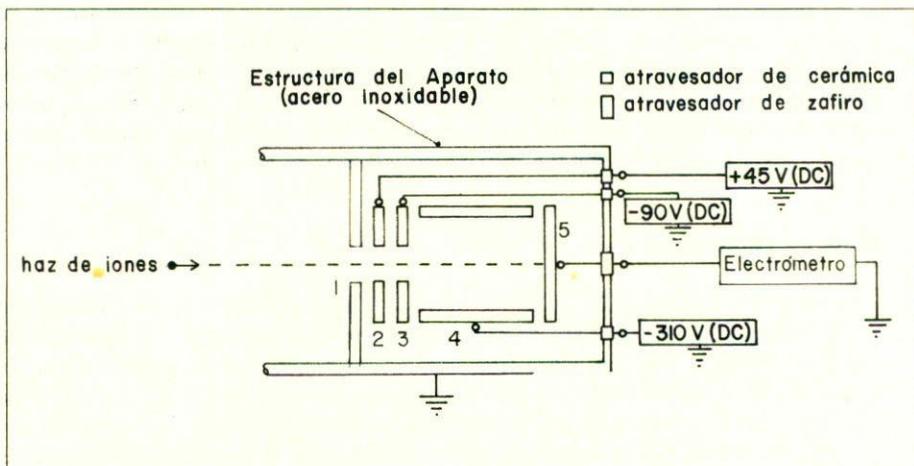


FIGURA 7. Caja de Faraday

y partículas neutras en estado base o excitado, que no afectan la lectura de la corriente de iones.

Es conveniente tener una caja de Faraday en la dirección de la fuente de iones (Figs. 1 y 2) para verificar la alineación del acelerador al medir esta corriente cuando no se crea el campo **B**. Para las conexiones eléctricas en la caja de Faraday

se emplean atravesadores de cerámica, y en especial uno de zafiro en la conexión al electrómetro, para evitar la presencia de una corriente de fuga que podría ocasionar lecturas erróneas (Fig. 7).

### 8. Operación del acelerador

La operación del acelerador es sumamente simple, una vez que se han determinado los parámetros que mantienen constante la descarga en arco (flujo de gas, corriente de filamento y voltaje de ánodo), el valor óptimo del potencial en la lente "einzel" ( $V_e = 0.84V_{ac}$ ), y las curvas de calibración que relacionan la energía de aceleración, la masa a seleccionar y la intensidad de inducción magnética,  $B$ , en el imán selector. Con el adecuado manejo de estos pocos factores, se obtiene un haz estable, suficientemente intenso y de muy baja dispersión. Para un haz de  $H_2^+$  a una energía de 1 keV se obtiene una corriente aproximada de 50 nA y una dispersión en energía de aproximadamente 0.5 eV.

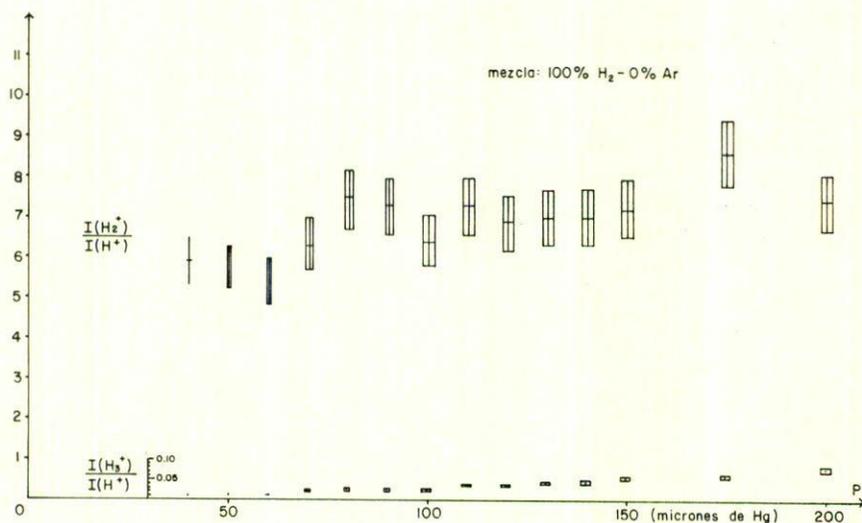


FIGURA 8. Poblaciones de los iones  $H_2^+$  y  $H_3^+$  respecto a  $H^+$  con 100%  $H_2$  en la fuente de iones.

### 9. Resultados

Los resultados que se presentan en las figuras 8, 9 y 10 representan el valor relativo de la población de los iones hidrogénicos referida a la población de  $H^+$  en diferentes condiciones de presión en el recinto de la fuente, la cual se varió entre 40 y 200 mtorr, y con diferentes porcentajes de gas de apoyo a la descarga, a saber: 100%  $H_2$  - 0% Ar, 75%  $H_2$  - 25% Ar y 50%  $H_2$  - 50% Ar. El voltaje de aceleración

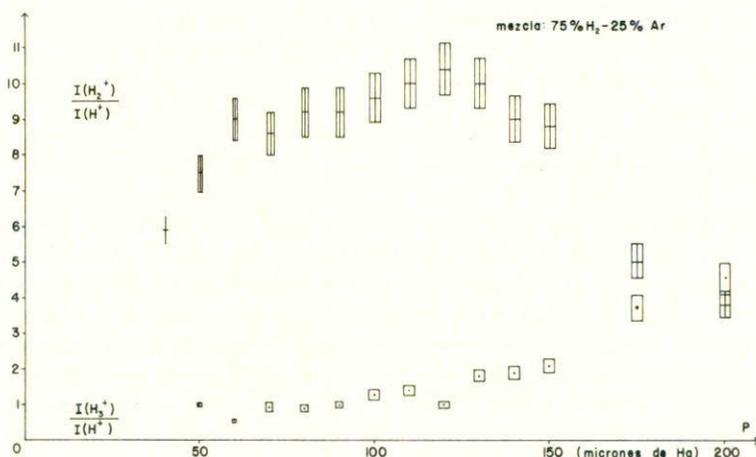


FIGURA 9. Poblaciones de los iones H<sub>2</sub><sup>+</sup> y H<sub>3</sub><sup>+</sup> respecto a H<sup>+</sup> para una mezcla con 75% H<sub>2</sub> - 25% Ar en la fuente de iones.

se fijó en 2 kV y la corriente de descarga en 0.1 A. Se emplea la notación  $I(H^+)$ ,  $I(H_2^+)$  e  $I(H_3^+)$  para denotar las corrientes de los haces de iones de H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup> y H<sub>3</sub><sup>+</sup>, respectivamente, medidas en la caja de Faraday, así como  $I(H_2^+)/I(H^+)$  e  $I(H_3^+)/I(H^+)$  para denotar las fracciones entre las respectivas corrientes de haces de iones.

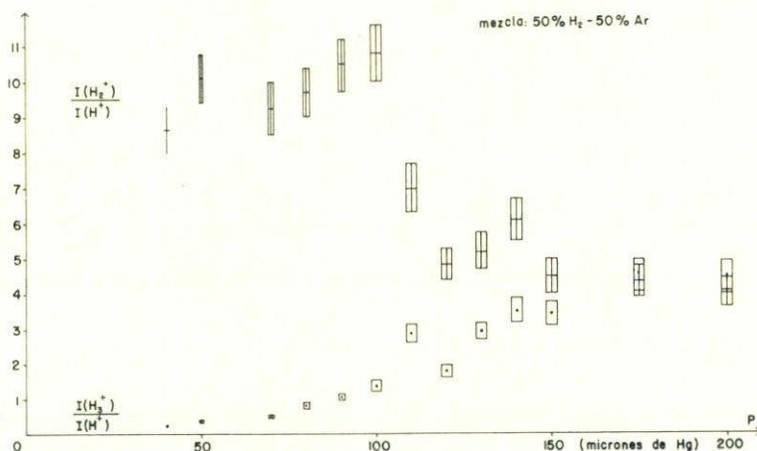
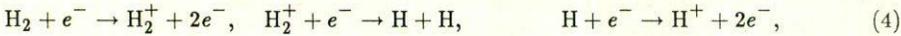
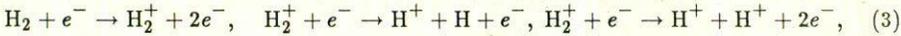
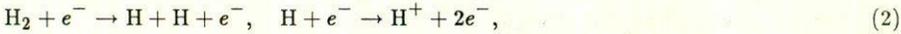


FIGURA 10. Poblaciones de los iones H<sub>2</sub><sup>+</sup> y H<sub>3</sub><sup>+</sup> respecto a H<sup>+</sup> para una mezcla con 50% H<sub>2</sub> - 50% Ar en la fuente de iones.

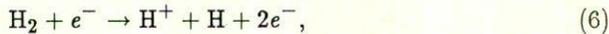
La figura 8 resume los resultados cuando no hay gas de apoyo (100% H<sub>2</sub>). Las impurezas presentes en este caso provienen del gas residual (aire, agua o del material mismo de la fuente). En las figuras 9 y 10 se muestran las poblaciones relativas para dos concentraciones distintas de gas de apoyo. De su análisis se observa que para presiones en el intervalo 40 a 150 mtorr, la fracción I(H<sub>2</sub><sup>+</sup>)/I(H<sup>+</sup>) toma valores alrededor de 8, mientras que en el resto del intervalo de presiones dicha fracción cae a la mitad. También se observa que la fracción I(H<sub>3</sub><sup>+</sup>)/I(H<sup>+</sup>) aumenta conforme aumenta la presión, y en el intervalo 150 a 200 mtorr su valor es alrededor de 4, como en el caso de la primera fracción. Incluso, se traslapan los puntos experimentales de las fracciones. En la figura 8, la fracción I(H<sub>2</sub><sup>+</sup>)/I(H<sup>+</sup>) tiene un valor aproximado de 7 en todo el intervalo de presiones, en tanto que la fracción I(H<sub>3</sub><sup>+</sup>)/I(H<sup>+</sup>) es menor que 0.1 en éste, mostrando una ligera tendencia creciente.

Una explicación del comportamiento de la fuente de iones frente a la variación de sus parámetros puede ser la siguiente: las concentraciones de H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup> y H<sub>3</sub><sup>+</sup> dentro de la cámara de descarga dependen de las secciones transversales que dan lugar a su formación, del gas de apoyo empleado y de la presión en la fuente. Se ha encontrado en otros estudios [2] que la concentración de H<sup>+</sup> está determinada por las colisiones dobles:



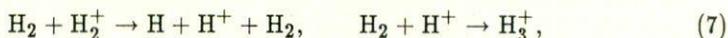
siendo la colisión H + e<sup>-</sup> la que más contribuye [2] a la concentración de H<sup>+</sup>.

En las colisiones simples:



se ha encontrado que [2]  $\sigma(H_2^+) > \sigma(H^+)$  para energías alrededor de 30 eV o mayores; es decir, es más probable que al colisionar un electrón con una molécula de hidrógeno, ésta se ionice, a que se disocie, con la consecuente ionización de uno de sus átomos. Por lo tanto, la reacción (5) es la que determina principalmente la concentración de H<sub>2</sub><sup>+</sup> en la cámara de descarga. Como se ve en las figuras 8, 9 y 10, esta especie tiene la mayor población, mostrando una ligera variación con la presión del gas. La formación de H<sub>3</sub><sup>+</sup> se explica a partir de la alta concentración de H<sub>2</sub><sup>+</sup> en la cámara de descarga, ya que la colisión ion-molécula tiene gran probabilidad de ocurrir al haberse disociado H<sub>2</sub><sup>+</sup> con una energía de impacto de

pocos eV, es decir, el proceso en la formación de  $H_3^+$  ocurre según la colisión:



que, como se observa en las figuras 8, 9 y 10, se incrementa con la presión, siendo este parámetro el que determina fundamentalmente su producción.

### Agradecimientos

Gran parte de los circuitos electrónicos y fuentes de poder fueron realizados por S. Pérez, cuya participación fue muy valiosa.

Trabajo parcialmente apoyado por CONACyT: PCECCNA-050230.

### Referencias

1. Laboratorio de Colisiones Atómicas y Moleculares, Laboratorio de Cuernavaca, IFUNAM (Folleto, 1985).
2. L. Vályi, *Atom and ion sources*, John Wiley & Sons, London, Inglaterra (1977).
3. L. Gutiérrez, *Poblaciones relativas de los iones hidrogénicos producidos en una fuente de descarga en arco*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM (1986).
4. L. Artsimovich y S. Lukianov, *Movimiento de las partículas cargadas en los campos eléctricos y magnéticos*, Mir, Moscú, URSS (1974).
5. E. Harting and F.H. Read, *Electrostatic lenses*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Holanda (1976).
6. P. Grivet, *Electron optics*, Pergamon Press, London, Inglaterra (1972).
7. J.A. Ray and C.F. Barnett, *J. Appl. Phys.* **42-8**, (1971) 3260.

**Abstract.** We design and build an electrostatic accelerator for atomic and molecular physics research in the energy range from 0.5 to 5.0 keV. We describe the main parts as well as the associated electronic instrumentation. We discuss its overall performance, and present, as preliminary result, the formation of hydrogenic products as a function of the parameters that influence its relative population.