

Etapa radial de un plasma focus: un estudio experimental

H. Acuña*, M. Milanese[†], R. Moroso y J. Pouzo[†]

*Instituto de Física Arroyo Seco, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional CP de Buenos Aires
7000 Tandil, Buenos Aires, Argentina*

*en asociación con Laboratorio de Fluidodinámica y Plasma, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de Mar del Plata, 7600 Mar del Plata, Argentina*

Recibido el 7 de octubre de 1999; aceptado el 14 de abril de 2000

Se muestran aquí algunos resultados de la dinámica de la lámina de corriente de un plasma focus en su etapa de compresión radial. Se utiliza una sonda magnética de muy pequeñas dimensiones para detectar la interfase plasma-campo magnético, mientras que el frente luminoso se detecta mediante un fotodiodo rápido. Se presentan resultados de descargas realizadas en deuterio puro; también se registra la producción de neutrones en cada descarga. Se encuentra que la brusca caída en la producción de neutrones a bajas presiones en este equipo (límite de las bajas presiones) está correlacionada con una separación significativa entre el frente luminoso y el frente magnético, de acuerdo con resultados previos obtenidos con otros métodos experimentales. En el rango de presiones óptimo para la producción de neutrones, se encuentra una buena correlación entre neutrones, velocidad de la lámina de corriente y separación entre ambos frentes.

Descriptores: Plasma focus; pinches; sonda magnética

Some results about the compression stage of the current sheath dynamics in a small plasma focus are shown. A very small magnetic probe is used to detect the interface plasma-magnetic field, while the luminous front is detected with a fast photodetector. Results are presented in pure deuterium discharges; also neutron yield is registered in each shot. It is found that the neutron yield drop, at low pressure, is correlated with a significant separation between both magnetic and luminous fronts, in concordance with previous results obtained with other experimental methods. In the pressure range of best neutron yield, a good correlation between neutrons, current sheath speed and temporal delay between both fronts, is found.

Keywords: Plasma focus; pinch; magnetic probe

PACS: 52.55.E

1. Introducción

En los equipos Plasmas Focus [1], “generadores de plasmas por descargas eléctricas rápidas”, se produce una lámina de corriente entre dos electrodos coaxiales inmersos en un gas a presión baja, en el presente caso deuterio (ver Fig. 1). Después de una etapa de aceleración coaxial se produce el desborde y luego la compresión radial por efecto *pinch*, con la formación de una columna de plasma de alta temperatura (alrededor de 1 keV) y densidad (alrededor de 10^{19}cm^{-3}) en las zonas (puntos calientes) donde la densidad y la temperatura son cerca de un orden de magnitud mayores. Esta columna de plasma tiene una vida de unos 100 ns. Durante este tiempo se emiten radiaciones corpusculares y electromagnéticas en pulsos de corta duración: rayos X duros (energía de centenares de keV, duración del pulso de algunos ns), rayos X blandos (energías de alrededor de 1 keV, en uno o dos estallidos de pocos ns cada uno), haces de iones energéticos (algunos keV) en dirección axial hacia adelante y de electrones hacia atrás, neutrones de 2.45 MeV en pulsos de alrededor de 50 ns de duración, etc.

Es conocido el hecho de que, para cada equipo, hay un rango limitado de presiones de operación dentro del cual la emisión de neutrones es apreciable. Es decir, existe un límite de bajas presiones [2] y otro límite de altas presiones [3, 4].

Las investigaciones realizadas sobre estos puntos han dado lugar a una explicación de cuáles son los fenómenos causantes de esos límites. Un punto de importancia es que, justo en el límite de bajas presiones, el frente luminoso del plasma se acelera fuertemente en la última fase de compresión radial, separándose del pistón magnético. Este fenómeno fue estudiado mediante técnicas diagnósticas ópticas, por detección de la luz emitida por el plasma [2].

En el presente trabajo se determina la dinámica del frente de ionización y del pistón magnético mediante otras técnicas: sonda magnética y registro de luz mediante un fotodiodo rápido. Mediante ellas puede conocerse el “espesor” de la lámina de plasma en distintos puntos de la etapa radial y de este modo confirmar resultados obtenidos en la Ref. 4. A la vez es posible obtener nuevos resultados efectuando correlaciones con magnitudes de interés como emisión de neutrones, radiación electromagnética en forma de rayos X blandos y duros, de partículas cargadas, etc.

2. El experimento: técnicas y resultados

En el plasma focus denso PACO (31 kV, 4 μF , 47 nH, 4 cm de diámetro interno, 10 cm de diámetro externo, 5 cm de longitud del cañón y 1.4 cm del aislante Pyrex), se realizaron mediciones de campo magnético azimutal usando una sonda

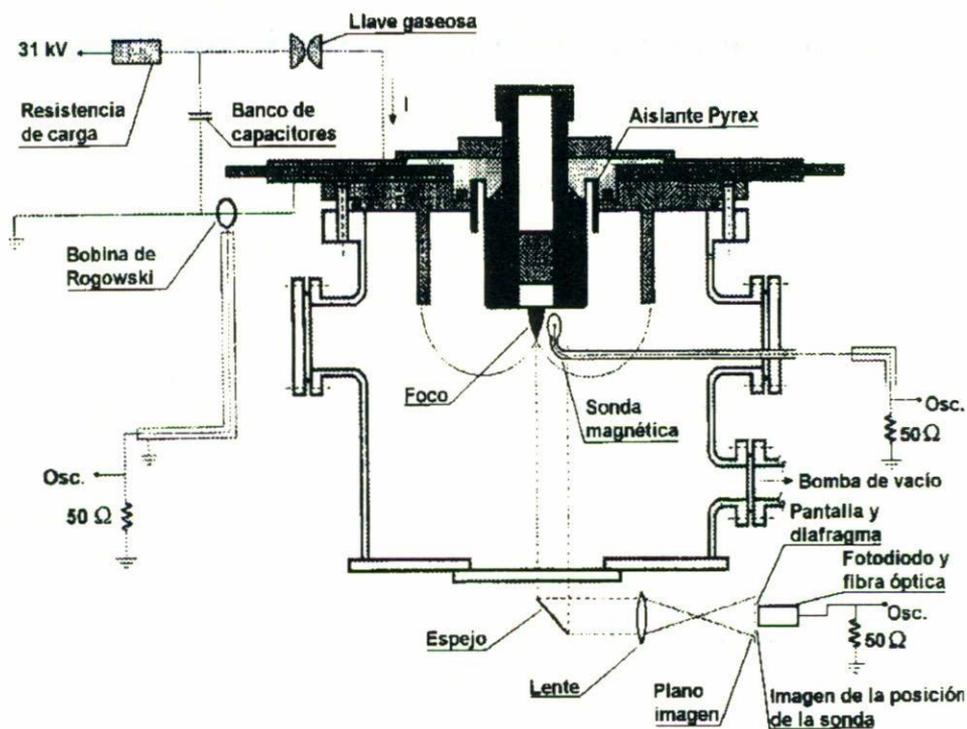


FIGURA 1. Esquema del arreglo experimental utilizado para la detección del frente luminoso y del pistón magnético de la lámina de plasma.

magnética [5–7] en la etapa radial y un fotodiodo enfocado a través de una lente a la posición de la sonda. En la Fig. 1 se muestra el esquema experimental usado. El gas de llenado fue deuterio.

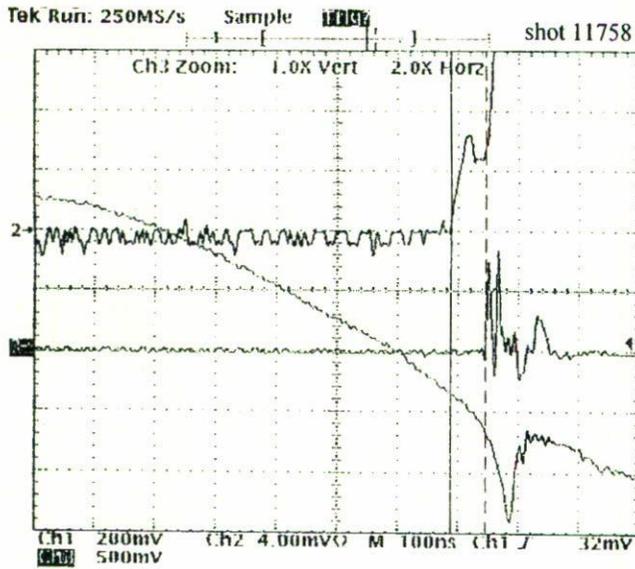
La sonda magnética consiste en una espira de 1 mm de diámetro, está dentro de un tubo capilar Pyrex de 4 mm de diámetro y 20 cm de largo. El tamaño de la sonda es pequeño y no perturba fuertemente la lámina de corriente. La calibración de la sonda fue hecha con dos bobinas de Helmholtz, la constante de calibración es de $4 \times 10^{-5} \text{ V/Tseg}$.

Para detectar el paso del frente luminoso por el mismo punto donde se registra el paso del pistón magnético, se utiliza un sistema óptico (ver Fig. 1) en la dirección del eje z para obtener una imagen de la sonda magnética, con una amplificación de 1.57, sobre una pantalla milimetrada. Se practica en ella un pequeño orificio (1 mm de diámetro) coincidente con la imagen de la sonda y justo detrás de él se ubica un extremo bien pulido de una fibra óptica de 2 mm de diámetro la que está recubierta de plástico PVC negro (poli-vinil-carbono). Esta fibra llega a la Jaula de Faraday, dentro de la cual se conecta a un fotodiodo. La señal pulsada que emite este fotodiodo es registrada en un osciloscopio digital TDS540A. La sonda magnética está ubicada cerca del ánodo ($z = 7 \text{ mm}$, $r = 10 \text{ mm}$) y dentro del cono de sombra del mismo. En este punto la lámina de corriente es cilíndrica, como se concluye de numerosas observaciones realizadas con fotografía ultrarrápida en este equipo [8], y no puede llegar al mismo tiempo luz originada en etapas previas al paso de la lámina por la sonda. Parte de luz reflejada en las paredes de la cámara o en

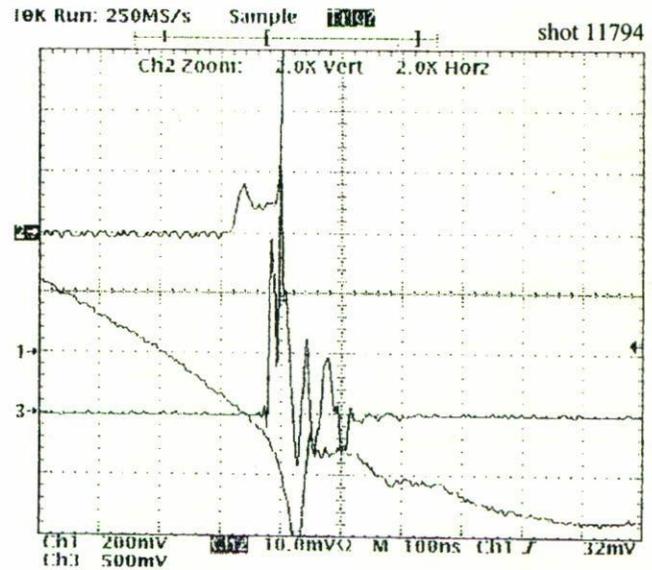
distintos elementos dentro de la misma, que podría contribuir en forma espuria a la iluminación de la zona de la fibra óptica es interceptada con el diafragma constituido por la pantalla milimetrada. Es necesario decir, asimismo, que la intensidad de luz reflejada es algunos órdenes de magnitud inferior que la luz emitida por el plasma que pasa por la sonda y que por estar la fibra óptica en el punto imagen de la sonda, el pulso de luz correspondiente al paso de la lámina de plasma por la sonda magnética es, por mucho, el aporte más importante. Se usaron además dos detectores de neutrones por activación de plata, para registrar el número de neutrones (integrados temporalmente) emitidos en cada descarga.

Por cada disparo se registraron simultáneamente en un osciloscopio tres señales: el pulso de luz del frente luminoso (frente de ionización) en la posición de la sonda, el paso del frente de campo magnético mediante la medición de dB_{θ}/dt (con la sonda magnética miniaturizada) y la señal dI/dt (I es la corriente de descarga) obtenida con una bobina Rogowski.

En las Figs. 2a y 2b pueden verse dos oscilogramas típicos: la traza superior corresponde al fotodiodo, la traza media a la señal de la sonda magnética y la traza inferior a la señal de Rogowski. Las trazas verticales en la Fig. 2a muestran el criterio utilizado para medir los tiempos. Se tomó como referencia temporal el *dip* de la Rogowski. Se observa que la señal del fotodiodo (medida con la traza vertical continua) precede a la de la sonda magnética (medida con la traza vertical discontinua) y al *dip* de dI/dt . Los tiempos de propagación en cada línea de transmisión de las distintas señales fueron medidos con una precisión mejor que 1 ns, para tener-

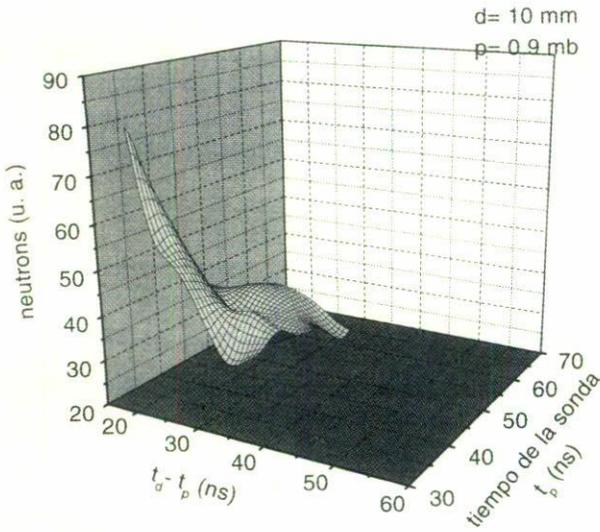


(a)

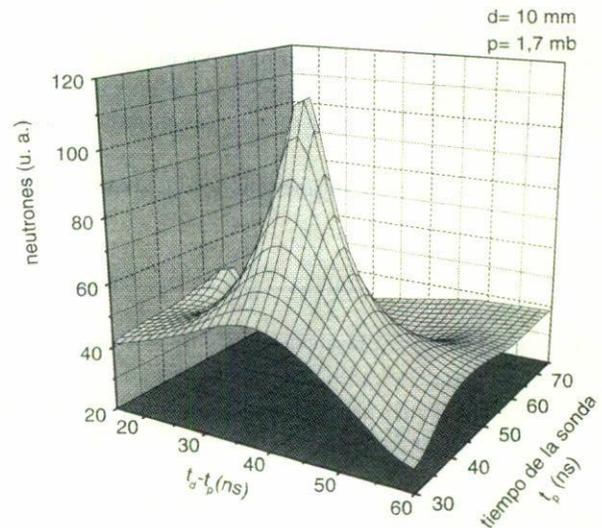


(b)

FIGURA 2. a) Oscilograma típico. Trazas superior: señal proveniente del fotodiodo (frente luminoso). Trazas media: señal de dB_θ/dt proveniente de la sonda magnética (pistón magnético). Trazas inferior: señal proveniente de la bobina Rogowski (dI/dt). Presión de operación: 0.9 mb; distancia de la sonda y del fotodiodo al eje: 10 mm; b) Igual que la a), pero a la presión de D_2 de 1.7 mb.



(a)



(b)

FIGURA 3. a) Gráfico tridimensional de promedios de la producción de neutrones respecto a la diferencia temporal entre el frente luminoso y el frente del pistón magnético ($t_d - t_p$) y, en el tercer eje, el tiempo de pistón magnético (t_p); todos los tiempos tomados respecto del pico en la señal del dI/dt . Presión de D_2 de 0.9 mb y distancia al eje: de 10 mm; b) Igual que la a), pero a la presión de D_2 de 1.7 mb.

los en cuenta en las determinaciones de las diferencias temporales. Téngase en cuenta, en las Figs. 2a y 2b, que la diferencia de tiempo de tránsito entre las señales de la sonda magnética y la del fotodiodo es de 28 ns. Se trabajó en dos rangos de presión de deuterio: entre 0.8 y 1.2 mb (rango de bajas presiones), y entre 1.5 y 2 mb (rango de altas presiones).

En las Figs. 3a y 3b se grafica en el eje z la producción de neutrones integrados temporalmente; en el eje x , la separación

temporal entre el frente luminoso y el pistón magnético (recordemos que se registran en la misma posición espacial $r = 10$ mm y $z = 7$ mm), en el eje y el intervalo entre el paso del pistón magnético por la sonda y la llegada al eje. Las estadísticas fueron realizadas sobre un total de más de 100 descargas.

Se puede observar lo siguiente: en el rango de bajas presiones (Fig. 3a) una emisión alta de neutrones corresponde a una pequeña separación temporal entre el frente luminoso y

el pistón magnético en coincidencia con un corto tiempo de llegada del pistón magnético al eje (pistón rápido). Esto coincide con las conclusiones del trabajo presentado en la Ref. 2. En presiones altas (Fig. 3b) hay un rango de valores de la separación temporal ($t_d - t_p$) entre el frente luminoso (t_d) y el pistón magnético (t_p) para el cual la producción de neutrones es alta.

3. Conclusiones

Con un novedoso y sencillo dispositivo experimental (no hay antecedentes de detección de campo magnético mediante sondas magnéticas en la etapa radial del *pinch*) se logra ver con claridad la existencia de dos frentes en la lámina de plasma en su etapa de compresión radial: un frente luminoso que aparece en primer lugar y, en segundo término, un frente o pistón magnético registrado a través de una brusca subida de dB_θ/dt . Dentro de cierto rango podemos correlacionar la separación entre ambos frentes ("espesor" de la lámina de plasma) con la producción de neutrones de fusión. Igualmente, es posible correlacionar la rapidez del frente magnético con la producción de neutrones. Con "espesor" de la lámina estamos refiriéndonos a la distancia entre lo que suponemos es el frente de ionización (frente luminoso) y la interfase plasmapistón magnético. También se aclara que en este análisis se considera que (al menos durante su paso por el punto de medición) las velocidades de ambos frentes se mantienen constantes, por lo que la diferencia ($t_d - t_p$) es proporcional al llamado espesor.

Es interesante notar en las mediciones efectuadas en el

rango de altas presiones que, para láminas muy gruesas o muy delgadas, la producción de neutrones es escasa, al igual que para pistones magnéticos muy lentos o muy rápidos. Hay un rango intermedio para el espesor y para la velocidad dentro del cual la producción de neutrones es buena. Una interpretación posible es que una lámina muy gruesa puede significar un plasma demasiado tenue para lograr un buen rendimiento por el mecanismo termonuclear (producción de neutrones proporcional a la densidad al cuadrado) o por el mecanismo haz-blanco (producción proporcional a la densidad del blanco). Por otra parte, una lámina demasiado delgada puede conducir a una ruptura prematura de la columna de plasma en el *pinch* final, con la consiguiente baja en la producción de neutrones de origen termonuclear (dicha producción es proporcional al tiempo de confinamiento). Por otra parte, un frente magnético demasiado lento daría lugar a un plasma parcialmente ionizado y a una compresión poco eficiente. Un pistón magnético demasiado rápido indicaría el despegue de un frente preionizante, generado por una alta energía o temperatura del plasma, que puede precalentar la zona del *focus* y producir la inhibición de una fuerte compresión, tal como se observa en la hipercompresión de blancos sólidos con radiación láser (confinamiento inercial), y en pleno acuerdo con el tra bajo anterior presentado en la Ref. 2. En consecuencia, estas mediciones preliminares con sonda magnética y detector de luz en la etapa de compresión radial, permiten deducir que un *pinch* eficiente (en el sentido de la producción de neutrones) se da, en la óptima presión de operación, para un rango intermedio de espesores de la lámina de plasma y de velocidades del pistón magnético.

* Dirección permanente: Universidad Nacional de Mar del Plata.

† Miembro de la Carrera del Investigador CONICET.

1. J.S. Brzozko *et al.*, in *Currents Trends in International Fusion Research*, edited by E. Panarella, (Plenum Press, New York, 1997) p. 11.
2. M. Milanese, R. Moroso, and J. Pouzo, *IEEE Transactions on Plasma Science* **21** (1993) 373.
3. M. Milanese, R. Moroso, and J. Pouzo, *IEEE Transactions on Plasma Science* **21** (1993) 606.
4. M. Milanese and J. Pouzo, *Nuclear Fusion* **25** (1985) 840.
5. F. Castillo, V. Sakaguchi, J. Lomeli, and J. Herrera, *Reporte interno FPD-FN-192*, ICN-UNAM.
6. G. Decker and D. Honea, *J. of Phys. E: Sci. Ins.* **5** (1972) 481.
7. J.G. Yang *et al.*, *Rev. of Sci. Ins.* **70** (1999) 3774.
8. F. Castillo, M. Milanese, R. Moroso, and J. Pouzo, *J. of Phys. D: Applied Phys.* **30** (1997) 1499.