

ACELERACION DE IONES POR CAMPOS COLECTIVOS EN DESCARGAS
ELECTRICAS FOCALIZADAS. SIMILITUD CON LOS PROCESOS FISICOS
EN FULGURACIONES SOLARES.

J. Feugeas (1), M.A. Bertinetti

IFR (CONICET - UNR)

OAMR

(1) Investigador del CONICET

RESUMEN: En experimentos con descargas eléctricas focalizadas en sistemas de electrodos coaxiales, haces de electrones con energías promedio de 300 KeV e iones con energías superiores al MeV, son generados en pequeños volúmenes de plasma altamente densificados. La observación de esta región antes, durante y después del momento de la máxima compresión, muestran estructuras de corriente ordenadas (filamentos) con fuertes campos magnéticos asociados (≥ 100 MGauss), de rápida evolución. El decaimiento de estos campos en tiempos del orden del nanosegundo, inducen potenciales eléctricos capaces de acelerar a los iones y electrones existentes en el plasma, hasta las energías observadas.

En el presente trabajo se muestran imágenes de alta resolución espacial y temporal de las descargas, en luz visible, radiación X ($E \geq 1$ KeV), y por impresión en láminas de policarbonatos, donde se puede apreciar la estructura filamentosa de la corriente. Se comparan estos resultados con los que se disponen de la observación de ciertas fulguraciones solares.

1. INTRODUCCION

Gran parte de los iones constituyentes de la radiación cósmica pueden atribuirse a procesos de aceleración derivados de un decaimiento de campo magnético en el tiempo. La inducción de un campo eléctrico debido a este decaimiento en una región en donde se encuentre un plasma provocará una aceleración de las cargas hasta energías E que dependerán del valor de la carga eléctrica q , de la intensidad del campo eléctrico E y las dimensiones x de la región dominada por este campo. La intensidad del campo eléctrico, a su vez, dependerá no sólo de la magnitud del cambio en la intensidad del campo magnético sino que también dependerá de la rapidez con que tiene lugar dicho cambio.

Todos estos factores combinados nos hacen pensar en la posibilidad de obtención de iones con energías equivalentes para situaciones muy distintas (tamaño de la región de aceleración, tiempos de decaimiento de B , cambio en B , etc.).

En este trabajo se muestran dos casos concretos como son los resultados obtenidos en un experimento de laboratorio (descargas eléctricas focalizadas) y los observados durante fulguraciones solares (solar-flares) en el mes de febrero de 1986, con el instrumental del Observatorio Astronómico de Rosario (filtro monocromador de Lyot: 6563 \AA).

2. EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

Los sistemas en donde iones y electrones son acelerados a través de un mecanismo como el indicado en la introducción, son conocidos como experimentos de aceleración de partículas por campos colectivos.

Uno de tales sistemas es el Plasma Focus. (2,3) Este equipo consiste en un sistema coaxial de electrodos (Fig. 1) conectado a un sistema de almacenamiento de energía eléctrica, generalmente un banco de capacitores cargado a una determinada tensión, (energía de almacenamiento: 1KJ - 10 MJ; voltaje de carga: 15 kV - 1 MV) a través de una llave de descarga rápida tipo Spark-gap ubicada sobre una línea de transmisión. Los electrodos se hallan aislados mediante un aislador, coaxial con los mismos, y todo el sistema (cañon coaxial) se ubica dentro de una camara que permite el llenado del espacio interelectródico con gases puros (hidrógeno, deuterio, helio, nitrógeno, etc.) a presiones controladas (10^{-1} - 10 mm Hg).

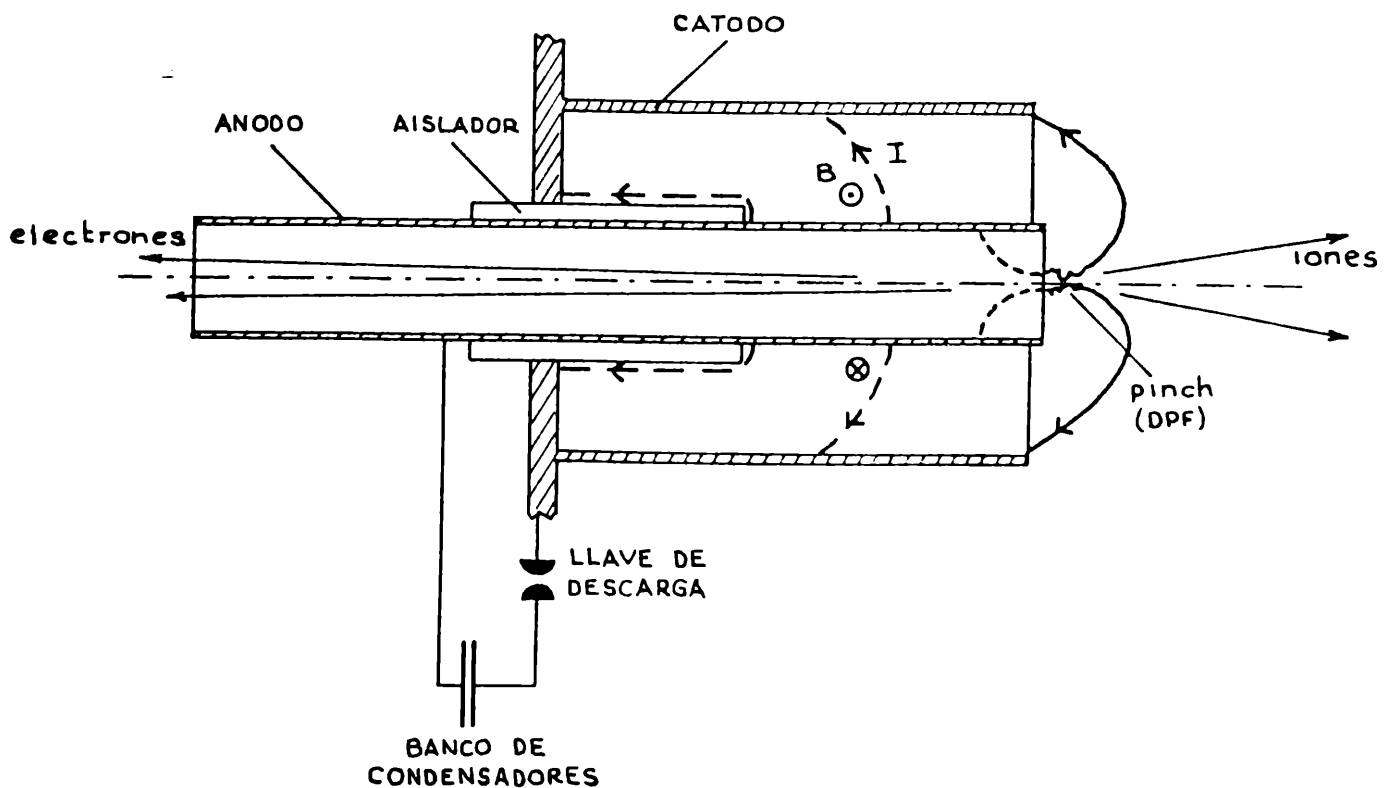


Fig. 1: Esquema de funcionamiento del sistema experimental

Por medio de una llave Spark-gap la energía almacenada en el banco de capacitores es descargada entre los electrodos. Para un diseño adecuado del sistema (que incluye geometría, tipo de gas, presión de llenado, tensión de carga y además parámetros eléctricos), la ruptura dieléctrica se produce sobre la superficie del aislador⁽⁴⁻⁵⁾. La lámina de plasma así generada, es empujada hacia el extremo del cañón coaxial por la interacción del campo magnético generado por la corriente externa de descarga y la corriente llevada por la misma lámina de plasma. Esta lámina al llegar al extremo se deforma, (etapa de roll-off) convergiendo hacia el eje de simetría enfrente del cañón central como se esquematiza en la Fig. 1.

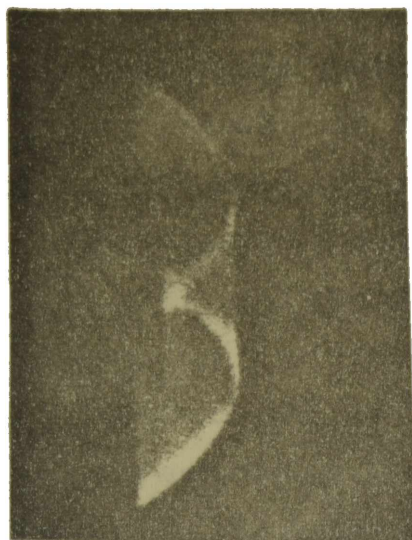
Es en este momento donde se produce una rápida densificación (hasta 10^{19} iones/cm³) y calentamiento (hasta temperaturas ~ 10 kèV) del plasma en una pequeña columna (1 mm de diámetro y 8 mm de largo) llamada foco de plasma denso.

En esta pequeña región, que dura decenas de nanosegundos, donde tiene lugar procesos de aceleración de iones y electrodos con energías que superan el MeV, y con emisión de neutrones de fusión nuclear cuando es utilizado deuterio como gas de llenado⁽⁶⁾.

3. Resultados Experimentales con un equipo Plasma Focus de 5 kJ de energía.

En las fotografías de las Figuras 2 y 3 se muestran imágenes de la lámina de plasma, tomadas con un tiempo de exposición de 5 nanosegundos, de un experimento con un equipo Plasma Focus de 5 kJ de energía y 16 kV de tensión de descarga⁽⁷⁾. Las imágenes de la fig. 2 nos muestran una vista lateral de la etapa final del roll off y una del colapso con la

formación de la columna del Foco de Plasma (DPF). La figura 3 nos muestra las correspondientes vistas frontales de dicha secuencia.



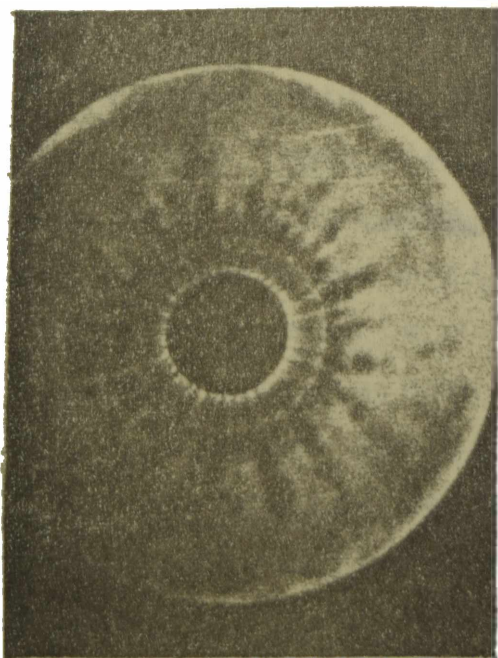
a



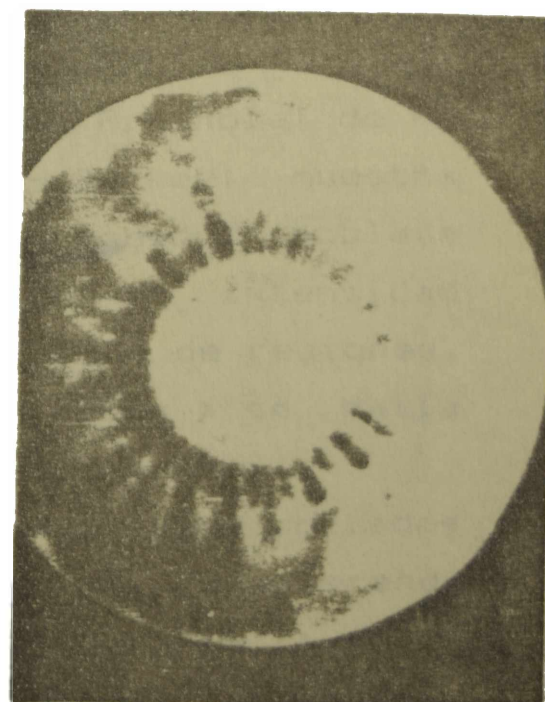
b

Fig.2: Imágenes laterales de la lámina de corriente tomadas con un tiempo de exposición de 5 nanosegundos (Ref.7)

a- Antes de la formación del DPF, y b- durante el DPF



a



b

Fig.3: Imágenes frontales (Ref.7) de la lámina, donde se puede observar la formación de filamentos de corriente.

a- antes y b- durante la formación del DPF

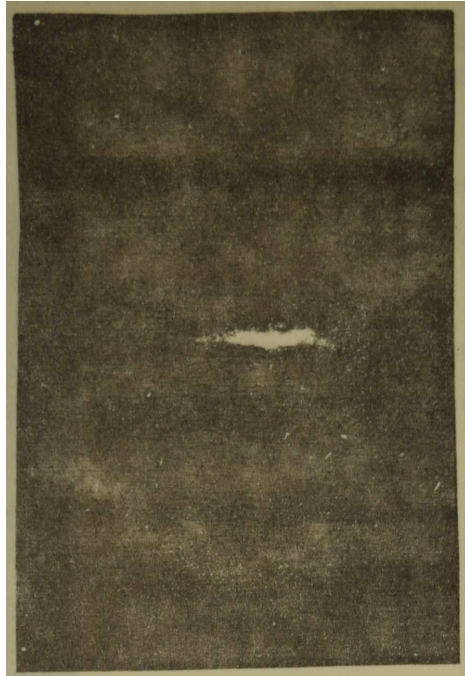
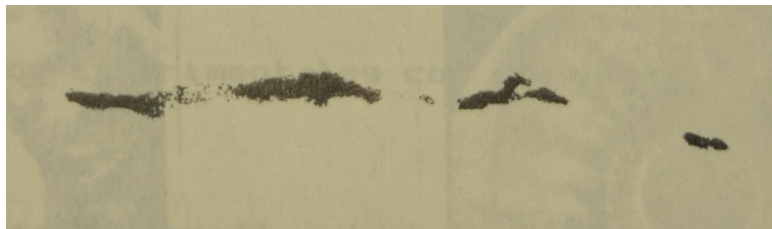


Fig.4: Imágenes del DPF en rayos X tomadas con una cámara "pinhole" a 75° (casi lateral). a- energía de los rayos X \geq 1 keV (Ref.7)



b
Fig.4b: Energía de los rayos X \geq 2 keV (Ref.9).

En estas imágenes pueden resaltarse dos aspectos importantes:

- a- La estructura filamentososa de la lámina de corriente (Fig. 3).
- b- La estructura de la columna del DPF (Fig. 2d y e), que muestra la formación de pequeños "loops" de corrientes durante la etapa del colapso.

Mediciones realizadas con sondas magnéticas (8,9) muestran: (i) la existencia de campos magnéticos colineales con las líneas de corriente de los filamentos, indicando una estructura helicoidal ordenada, con verticidades opuestas en filamentos adyacentes; (ii) campos magnéticos fuertes axiales y azimutales próximos al DPF, durante su formación.

Los resultados (i) muestran una natural tendencia a este tipo de ordenamiento de corrientes, con la consiguiente generación y amplificación de los campos magnéticos asociados.

Los resultados (ii) indican que durante el colapso y formación del DPF estos filamentos de corriente contribuyen a la formación de una estructura similar suma de todos ellos.

La imagen (obtenida con una cámara Pin hole) de rayos X de esta zona (energía de rayos X: 1 - 20 keV) muestra una imagen global de las dimensiones de la región, poblada de pequeños nódulos de marcado incremento en intensidad (Fig. 4). Esto nos permite visualizar el tamaño de regiones, en donde la mayor intensidad de emisión de rayos X se halla asociada con una mayor densidad de corriente.

Una estimación de los campos magnéticos asociados a estas estructuras de corriente puede hacerse, considerando primero el valor de la corriente circulante durante la formación del DPF $I_p = 700$ kA, y segundo un número de filamentos igual a 40. Esto nos da un valor de corriente por filamento de aproximadamente $I_f \sim 17,5$ kA.

Teniendo en cuenta las dimensiones de las estructuras observadas en rayos X (0.1mm), podemos suponer que los campos magnéticos en la superficie de los filamentos (tomando como diámetro de los filamentos una magnitud similar de 0,2mm) valdrían:

$$B = \frac{\mu_0 I_f}{2\pi x} \approx 35 \text{ T}$$

Considerando que en la región de formación del DPF se da la convergencia de todos estos filamentos y que en la región donde aparece cada nódulo convergirán dos o más de ellos, el campo magnético puede estimarse al menos de 100 T.

Tomando en cuenta las mediciones de la duración de la emisión de los pulsos de rayos X ($\Delta t \sim 1 \text{ ns}$)⁽¹⁰⁾, como tiempo típico de estos procesos, y que estos consisten en una rápida relajación de los campos magnéticos asociados; es posible estimar los campos eléctricos inducidos en estas pequeñas regiones. Mediciones experimentales del campo magnético localizado en pequeñas regiones han sido reportadas en algunos trabajos. (i)- por observaciones espectroscópicas (desdoblamiento de líneas de impurezas)⁽¹¹⁾, que arrojan valores integrados en regiones del tamaño de algunos milímetros, de 200 T; (ii)- por observación de la anisotropía de intensidad de emisión de rayos X (que brinda información sobre las corrientes electrónicas) que con una resolución espacial de 0,1 mm arroja valores del campo magnético de $2 \times 10^4 \text{ T}$.⁽¹²⁾

Un cálculo estimativo sencillo nos permite determinar los potenciales aceleradores generados en estas regiones. Considerando el decaimiento de un campo magnético $\Delta B = 200 \text{ T}$ (tomando en cuenta simplemente el valor medio según el método (i) y reportado en la referencia 11) en un

tiempo $\Delta t = 1 \text{ n s}$, el campo eléctrico E inducido en el proceso puede ser estimado a través de la expresión

$$E \sim \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (1)$$

que con los valores de ΔB y Δt indicados nos da un $E \sim 2 \times 10^{11} \text{ v/m}$.

Si consideramos a la región donde se producen estos procesos de dimensión $x = 0,1 \text{ mm}$ (tamaño de los nódulos en la imagen de rayos X en la fig. 4b), la diferencia de potencial inducida,

$$V = E \cdot x$$

será entonces de aproximadamente 20 MV. Un cálculo similar utilizando el valor de B medido según el método (ii) (referencia 12) nos arroja valores de $V \sim 2 \text{ GV}$.

Estos valores de V son suficientes como para acelerar iones y electrones hasta las energías reportadas.

4. Aceleración de partículas durante la formación de flares en el Sol.

Un cálculo similar puede hacerse para la situación presente durante la formación de un "flare" en la cromósfera solar.

Como ejemplo podemos tomar el "flare" solar que aparece en la Figura 5 (fotografiado el 11 de febrero de 1986 por los autores (13)).

Este "flare" del tipo Sb 1, tiene asociados campos magnéticos de $1,5 \times 10^{-2} \text{ T}$. (14) Suponiendo que durante los 5 minutos de duración de la etapa de "flash", se produce la

relajación del campo hasta un valor de $0,5 \times 10^{-2} T^{(14)}$, podremos entonces estimar el campo eléctrico inducido tal cual se hizo en el punto anterior (ecuación (1)). Tomando en consecuencia un $\Delta B = 1 \times 10^{-2} T$ y un $\Delta t = 300$ s, tendremos un $E \sim 130$ v/m.

Teniendo en cuenta las dimensiones características del "flare", $x \sim 4000$ Km (fig. 5), y considerando la expresión (2), podemos también en este caso estimar la diferencia de potencial inducida en la región. En este caso resultará de $V \sim 500$ MV.

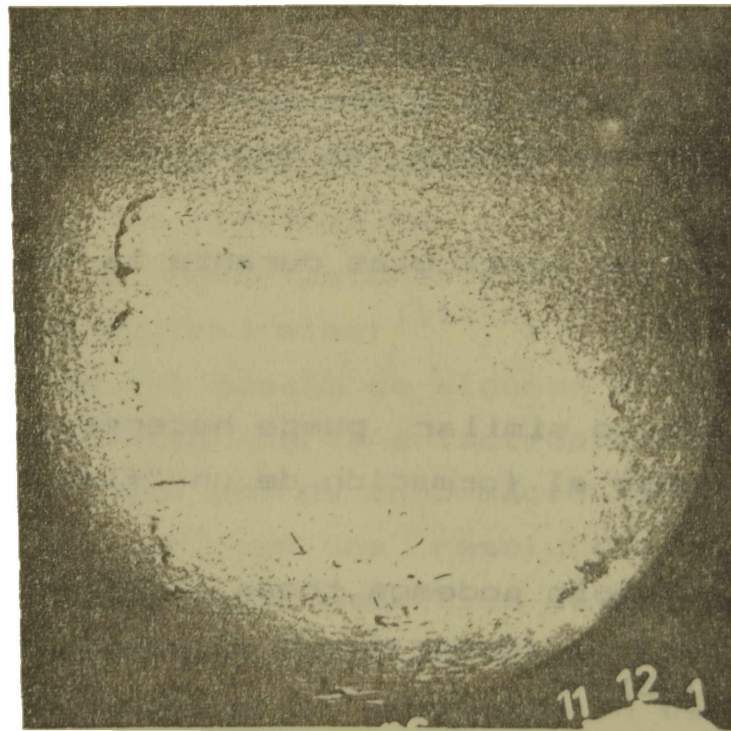


Figura 5: Flare solar (flecha) registrado el 11 de febrero de 1986 a las 1831 UT (Ref. 13).

Esta diferencia de potencial estimada alcanza valores capaces de acelerar iones y electrones hasta las energías medidas durante la aparición de los "flares". (14)

Sin embargo, el valor del campo magnético utilizado corresponde al valor integrado en una región, debido a los límites de resolución del instrumento de medición. Valores de B mucho más intensos pueden esperarse localizados dentro de estas regiones.

Estos valores de campo más intensos deberían ser tomados en cuenta en los cálculos, con lo que se obtendrían valores de V superiores al estimado anteriormente.

5. CONCLUSIONES

Tanto en los experimentos de laboratorio descriptos, como en las observaciones de "flares" solares, pueden ser considerados como responsables de la aceleración de iones y electrones, a los decaimientos de campos magnéticos. Los procesos físicos en ambos casos pueden asimilarse con solo tener en cuenta factores de escala.

Sin embargo, tanto los valores de B , de x , como de t , están directamente vinculados al grado de resolución de los métodos de medición. En tal sentido, tanto en lo que hace a los experimentos de laboratorio como a la observación solar, son necesarias aún sustanciales mejoras.

En el cuadro siguiente se resumen los resultados con fines comparativos.

- 7- Feugeas J. 1983: Tesis Doctoral Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- 8- Bostick W. et al. 1971: Proc. 10th Int. Conf. Phenomena in Ionized Gases, Oxford, 1971 Parsons and. Co. Publ.
- 9- Bostick W.; Nardi V.; Feugeas J. 1979: Proc. of 2nd. Internat. Conference on Megagauss Fields and Rel. Topics.
Washington D.C. U.S.A., pp. 533.
- 10- Bostick W. et al. 1976: Proc. of the Int. Conf. on Energy Stor., Compression and Switching. Plenum Press pp. 261.
- 11- Forrest M.J. et al. 1973: Proc. 6th European Conf. Plasma Phys and Nuclear Fusion, Moscu, J.I.N. Res. edit. Vol. I, p. 363.
- 12- Bostick W. et al. 1972: Proc. II Topic Conf. Pulsed High-Plasmas, Garching. Lotz edit, p. 155. Bostick et al. 1975: Annals New York Acad. of Sci. 251.
- 13- Bertinetti M.A. 1986: Trabajo Especial de Licenciatura en Física, Universidad Nacional de Rosario.
- 14- de Jager (a ser publicado en Space Science Reviews).