

DISTRIBUCIONES DE ELECTRONES CONVOY EN LAMINAS SOLIDAS USANDO TEORIAS DE TRANSPORTE

M. L. Martiarena y C. R. Garibotti

Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, CC439,
8400 San Carlos de Bariloche y CONICET

Analizamos teóricamente la penetración de un haz de partículas de alta velocidad en una lámina sólida, evaluando la distribución en velocidad de los electrones emitidos en la dirección de salida del haz.

Escribimos una ecuación de transporte para el balance de carga de iones y átomos en el haz, y para los electrones producidos en el interior del sólido. Consideramos que los mecanismos de producción son el de pérdida y captura electrónica al continuo. En los términos de ganancia y pérdida de la ecuación de transporte consideramos los choques elásticos y de excitación de los electrones con los átomos del sólido, a través de las correspondientes secciones eficaces.

Resolviendo numéricamente las ecuaciones describimos el comportamiento experimental del espectro electrónico, que consiste en el pico de electrones convoy y un máximo en el fondo de electrones retardados. Esto permite suponer que el efecto dominante en el espectro es la producción de electrones convoy dentro de la lámina.

En la colisión de un haz de iones o átomos con una lámina sólida delgada se observa una gran emisión de electrones con la misma dirección y velocidad del haz¹, éstos son denominados convoy y proporcionan información para entender la interacción entre los iones y el sólido. Dado que los electrones convoy tienen una velocidad muy baja en el sistema del proyectil dependen, y, por lo tanto, permiten estudiar la relación, del ion con su entorno en el sólido: efectos de densidad, procesos de excitación, ionización y captura en el ion y en los átomos del blanco, respuestas colectivas del plasma electrónico en la lámina y así mismo características superficiales.

La descripción de los electrones producidos en colisiones ión-sólido se basa, hasta el momento, en la hipótesis que los mecanismos son análogos a los considerados en colisiones ión-átomo.

La distribución de velocidades característica de los electrones convoy es una cúspide centrada en la velocidad del proyectil. En la colisión con gases dicha estructura es atribuida a dos efectos dominantes: la captura de un electrón del blanco en un estado del continuo del ión (ECC) o la transición de un electrón del proyectil desde un estado ligado a un estado del continuo, efecto que se designa como pérdida electrónica (ELC)². Ambos efectos son importantes en el sólido dado que al penetrar el haz iónico, parte de él captura electrones del medio, conformándose en un haz de iones y átomos. Para láminas suficientemente gruesas se logra un equilibrio de carga entre las componentes del haz, como resultado de los procesos de captura y pérdida electrónica.

Experimentalmente se observa, en función del espesor de la lámina, un espectro electrónico que, además de la cúspide correspondiente a electrones convoy, presenta, cuando el proyectil es atómico y porta electrones, una loma anexa a velocidades menores: la posición e intensidad de esta loma depende del espesor³. Esta loma, que no es observada cuando el blanco es gaseoso, debe ser atribuida a efectos de colisión múltiple dentro de la lámina. En la Figura 1 mostramos el espectro para H⁺ incidendo sobre una lámina de C⁴.

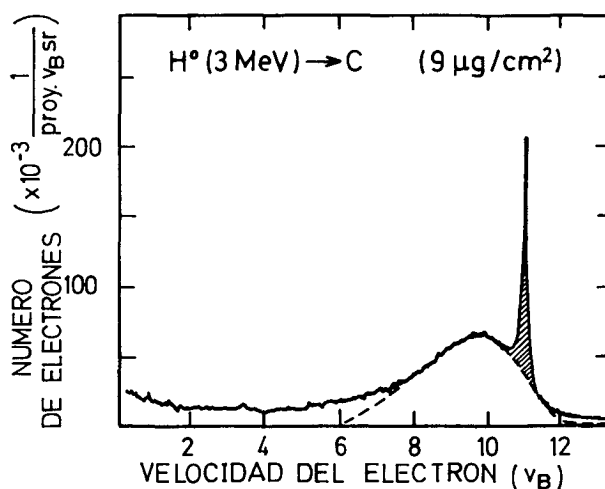


Figura 1: Espectro de electrones para H⁺ incidendo sobre una lámina de C.

Un modelo ha sido propuesto recientemente para explicar estos efectos. En él se considera que el haz evoluciona hacia el equilibrio de carga y simultáneamente produce electrones, por ELC y ECC, en cada "diferencial de espesor" dx del material, donde x es la coordenada paralela al haz. El frenamiento de estos electrones producidos se describe introduciendo un libre camino medio⁴ o la función de Landau para la pérdida de energía electrónica⁵. En este trabajo hemos considerado el problema a partir de una teoría cinética generalizada, donde en la ecuación de Boltzmann se incluyen términos correspondientes a procesos de regeneración y destrucción de partículas⁶. De este modo la ecuación que satisface la distribución de electrones $f(\vec{v}, x)$ es:

$$\begin{aligned}
 v_x \frac{\partial f_e}{\partial x} = & n_I(x) n_{A^0} \frac{d\sigma^i}{dv} + n_A(x) n_{A^0} \frac{d\sigma^{el}}{dv} + n_{A^0} \int f_e(\vec{v}', x) \frac{d\sigma^{el}}{dv} \delta(\vec{w}') d\vec{w}' d\hat{n}' \\
 & + n_{A^0} \int f_e(\vec{v}', x) \frac{d(\sigma^{ie} + \sigma^{*e})}{dv} \delta(\vec{w}') d\vec{w}' d\hat{n}' - n_A f_e(\vec{v}, x) \int \frac{d\sigma^{ee}}{dv} \delta(\vec{w}') d\vec{w}' d\hat{n}' \\
 & + n_{A^0} \int f_e(\vec{v}', x) \frac{d(\sigma^{ie} + \sigma^{*e})}{dv} \delta(\vec{w}') d\vec{w}' d\hat{n}'
 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde suponemos que el haz incidente es monocromático, de velocidad v_i y no sufre dispersión, la densidad de átomos en el sólido (A_0) es fija n_{A^0} . Como fuentes de electrones se incluyen los canales de ionización del blanco (s^i) y de pérdida electrónica (s^{el}) de los átomos del haz (A). Estos electrones sufren colisiones elásticas (s^{el}) de excitación (s^{*e}) y de ionización (s^{ie}) con los A_0 , lo cual los frena y dispersa angularmente. Para las distribuciones de iones $n_I(x)$ y de átomos $n_A(x)$ en el haz podemos escribir ecuaciones de transporte, que dependen de s^{el} y de la sección eficaz de captura s^i y que pueden ser resueltas analíticamente.

Introducimos expresiones analíticas para las secciones eficaces, resultantes del acuerdo entre

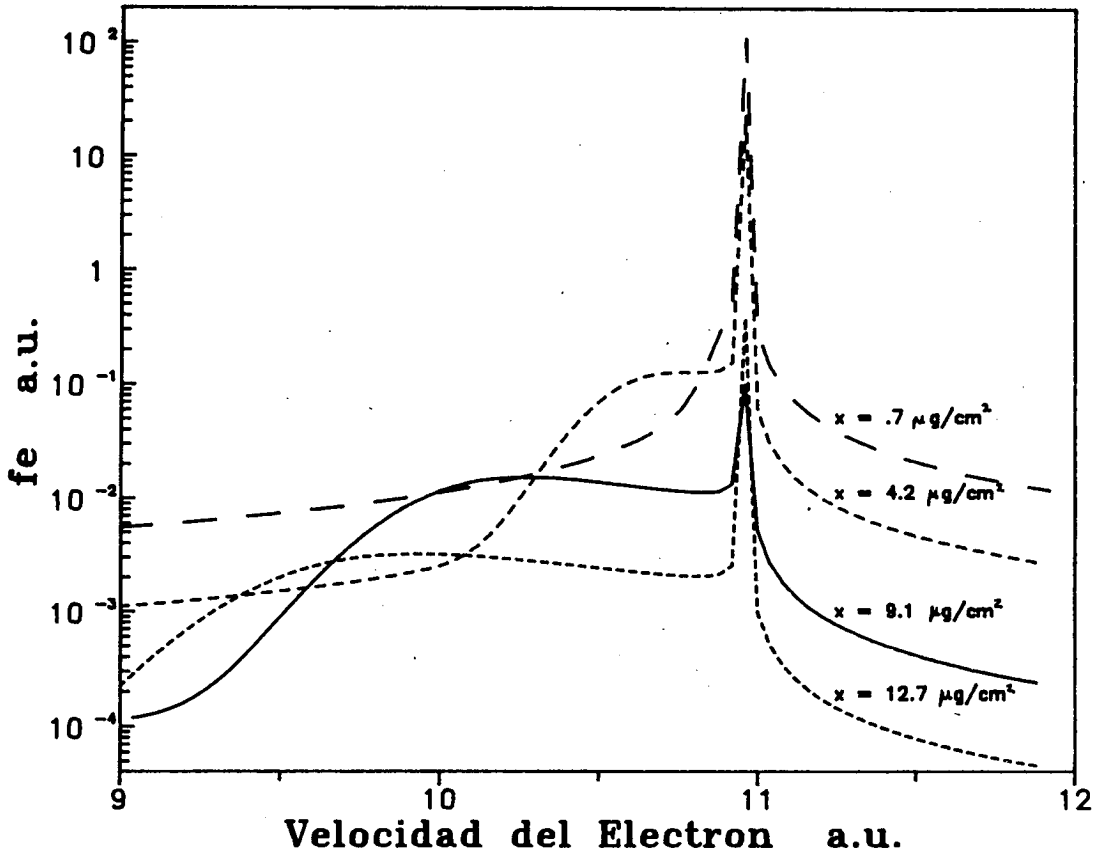


Figura 2: Distribución de velocidades de los electrones para diversos espesores de la lámina de C cuando inciden átomos de H de 3 Mev.

teoría y experimentos. Dado el conocimiento actual de las secciones eficaces inelásticas para colisión de electrones sobre carbón, solo incluimos la excitación a los primeros niveles atómicos. Proponemos que $d\sigma_i/d\vec{v}$ y $d\sigma_{el}/d\vec{v}$ están básicamente determinadas por el factor de Coulomb⁷.

$$f_c = \frac{2\pi}{|\vec{v}-\vec{v}_+|} \left[1 - e^{-2\pi|\vec{v}-\vec{v}_+|} \right]^{-1} \quad (2)$$

Resolvemos la ecuación (1) por un método de diferencias finitas. En la Figura 2, representamos la distribución de velocidades de los electrones que salen de la lámina en la dirección del haz para diversos espesores de esta, cuando inciden átomos de H, de 3 Mev, sobre carbón.

El comportamiento está en buen acuerdo con las observaciones experimentales. Para láminas muy finas observamos sólo el pico de electrones convoy, pero a medida que el espesor aumenta comienza a aparecer una segunda estructura, que se desplaza hacia la zona de bajas velocidades. Esta loma es causada por los electrones convoy, que siendo pro-

ducidos en el interior del material por los procesos de pérdida y captura en el haz por colisiones inelásticas, pierden parte de su energía o son dispersados. Cuando el espesor de la lámina es grande estos electrones se termalizan.

REFERENCIAS

1. W. Meckach y P. Focke, Nucl. Instr. Meth B33, 255 (1988).
2. K. Dettmann, K. Harrison y M. Lucas, J. Phys. B7, 269 (1974).
3. J. S. Briggs y M. H. Day, J. Phys. B13, 4797 (1980).
4. Y. Yamasaki y N. Oda, Phys. Rev. Lett, 52, 29 (1984).
5. P. Koschar et al., Nucl. Instr. and Meth. B24/25, 153 (1987).
6. R. Barrachina, A. Goñi, P. Focke y W. Meckbach, Nucl. Instr. Meth. B33, 330 (1988).
7. M. L. Martiarena y C. R. Garibotti, Preimpresión CAB, enviado a Physica A, 1989.
8. W. Meckbach, I. B. Nemirovsky y C. R. Garibotti, Phys. Rev. A24, 1793 (1981).