

PRODUCCION DE ELECTRONES "CONVOY" EN INTERACCIONES
ION-ATOMO Y ION-LAMINA SOLIDA

W.Meckbach y I.B. Nemirovsky

Durante la última década se intensificó el estudio detallado de la distribución doblemente diferencial, en energía o velocidad y en ángulo de la emisión de electrones inducida por colisiones ión-átomo y la interacción ión-lámina sólida.

Pasemos primero a una breve discusión de la emisión de electrones en colisiones "únicas" del tipo ión-átomo.

Si el ión no trae electrones (H^+ , He^{++} , Li^{+++} etc.) el origen del electrón emitido puede ser solamente la ionización del átomo blanco. En este caso la distribución en el espacio vectorial de las velocidades $\vec{v}_e$ de los electrones se agrupa alrededor de la superficie esférica determinada por la colisión binaria ión-electrón libre. Cerca del origen, definido en el sistema de laboratorio, o sea para velocidades $\vec{v}_e$ bajas, dicha distribución se describe por una onda de Coulomb, resultando una sección eficaz divergente para $\vec{v}_e \rightarrow 0$. Esta divergencia puede considerarse como consecuencia de la atracción Coulombiana ión residual del blanco-electrón: el electrón se mueve en un estado del continuo del blanco.

Sin embargo se demostró que esta descripción de la distribución electrónica no es completa. En 1971 Crooks y Rudd¹ observaron por primera vez un pico característico en forma de cúspide que aparece al aproximarse la velocidad del electrón emitido a la velocidad del ión: $\vec{v}_e \approx \vec{v}_i$, o sea para $\vec{v}_e - \vec{v}_i = \vec{v}'_e \rightarrow 0$. Efectivamente, al considerar la colisión como un mecanismo de transferencia de carga, se describe la distribución electrónica por una onda de Coulomb en el sistema del ión-proyectil, resultando en este caso una sección eficaz divergente para $\vec{v}'_e \rightarrow 0$, Dettmann et al., 1974². En el sistema del laboratorio este pico se levanta a $\vec{v}_e \approx \vec{v}_i$, o sea en el centro de la superficie esférica determinada por la ionización binaria del blanco. El electrón "convoy" producido por este mecanismo acompaña al ión proyectil en un estado del continuo; la colisión se denomina "de transferencia al continuo".

Si el proyectil (H^0 ; He^0, He^+ ; Li^0 , Li^+ , Li^{++} ... iones pesados de cargas $<Z$) trae electrones a la colisión, existe la posibilidad de una ionización colisional del mismo, produciéndose la distribución electrónica, descrita anteriormente, en un sistema de referencia que se mueve con $\vec{v}_i$, la velocidad del ión. Una transformación al laboratorio (Drepper y Briggs, 1976³) conduce a un máximo de la sección eficaz a $|\vec{v}_e| = |\vec{v}_i|$, independientemente del ángulo de emisión θ de los electrones con respecto a la dirección del haz iónico. Para $\vec{v}_e = \vec{v}_i$ ($\theta=0$) resulta de nuevo una sección eficaz divergente. Resulta que la ionización del proyectil da otro origen de electrones convoy.

Una serie de trabajos de investigación experimental y teórica sobre el proceso han sido resumidos por Meckbach y Baragiola (1977)⁴. Se hace énfasis en la influencia decisiva que, debido a la divergencia de la sección eficaz para $\vec{v}_e \rightarrow \vec{v}_i$, desempeñan las resoluciones, en ángulo θ y velocidad $|v_e|$ (o energía) de los espectrómetros de electrones usados. Estas resoluciones determinan -en el espacio $\vec{v}_e$ - un "volumen de resolución" sobre el cual el equipo integra la sección eficaz. Dado que la forma de la sección eficaz depende sólo de la diferencia de velocidades, $\vec{v}_e - \vec{v}_i$, el obvio aumento del volumen de resolución con v_i conduce a que el ancho de los picos medidos es proporcional a v_i , la velocidad del ion. Esta proporcionalidad ha sido verificada experimentalmente en varios trabajos^(1,2,5,6).

Por otra parte las teorías de transferencia de carga al continuo^{2,7,8} describen la sección en términos de una función del valor absoluto de la diferencia de velocidades ión-electrón, $|v| = |\vec{v}_e - \vec{v}_i|$, lo cual implica una distribución esférica. Sin embargo, mediciones recientes realizadas con el acelerador v.d. Graaff Tandem del Laboratorio de Oak-Ridge⁹ demuestran una asimetría de la distribución en el sentido de un ensanchamiento hacia velocidades menores. Tal asimetría ha sido discutida teóricamente por Shakeshaft y Spruch (1978)¹⁰ y el grupo teórico de la Div. Haces Iónicos del CAB en términos de una atracción electrostática ejercida sobre el electrón transferido al continuo del ión proyectil, por el ión residual del blanco.

Es de hacer notar que las mediciones realizadas en Oak-Ridge muestran que pasando de iones O^{8+} desnudos, a iones proyectiles O^{4+} de la misma velocidad, la asimetría citada no aparece.

Dado que para O^{4+} predomina la ionización del proyectil, es de suponer que en este mecanismo la atracción ejercida por el blanco no es efectiva.

Pasando a la discusión de distribuciones electrónicas emergentes de láminas sólidas, hay varios modelos o hipótesis sobre la aparición de los electrones "convoy" que dan lugar a picos experimentales muy similares a los observados bajo condiciones de colisión única ión-átomo.

Dettmann² argumenta que estos electrones se producen por un mecanismo de transferencia de carga al continuo producido en la última capa de la superficie del sólido, donde emergen los proyectiles. Electrones provenientes de más adentro se dispersan por colisiones en el sólido. Argumentos en contra de este modelo son: primero, la dispersión no necesariamente es suficiente para hacer desaparecer a los electrones del pico observado, sino tendría que dar origen a un ensanchamiento no observado experimentalmente. Segundo, es difícil aceptar condiciones de colisiones únicas ión-átomo en un sólido o en su superficie.

Brandt y colaboradores¹¹ proponen un mecanismo totalmente diferente para la producción de electrones convoy en sólidos. El ión actúa sobre el plasma de los electrones de valencia del metal induciéndose una oscilación de densidad electrónica que acompaña al ión, dando lugar a depresiones periódicas que viajan con la velocidad del ión como la estela ("wake") atrás de un barco. Electrones atrapados en estados estacionarios en dichos pozos de potencial viajarían y luego emergerían del sólido con una distribución de velocidades alrededor de $\vec{v}_i$.

Resulta que la forma de dicha distribución no concuerda con la observada experimentalmente¹², la cual se asemeja más a la debida al mecanismo de atracción coulombiana por el ión, activa en colisiones únicas ión-átomo. Por otra parte, sin embargo, la proporcionalidad del ancho de los picos a la velocidad del ión v_i no se cumple para el caso de la interacción ión-sólido, sino que se observa que dichos anchos son independientes de v_i ^{13,14}. Esta independencia tampoco está de acuerdo con la predicción de la teoría del "wake riding" en sólidos¹¹.

Mediciones de Laubert et al.¹³ realizadas con los aceleradores tandem de Oak Ridge y Brookhaven demuestran claramente que las asimetrías de los picos de CTC, resultantes de la interac-

ción electrón-ión residual del target, no aparecen en las distribuciones medidas con iones emergentes de sólidos. Aparecen, en cambio, picos simétricos que se asemejan a los que en colisiones con blancos gaseosos resultan de la ionización del proyectil⁹ discutida anteriormente.

Es sabido, que en un sólido, y especialmente en su superficie, se produce la ionización de proyectiles pesados¹⁵, resultando la distribución de carga del haz emergente. Los electrones producidos por esta ionización del proyectil bien pueden contribuir a la aparición de electrones convoy observada detrás de láminas sólidas.

El mecanismo de la atracción coulombiana, que en colisiones únicas, o sea con blancos gaseosos, da lugar a los picos característicos de electrones convoy, bien puede ser activo al y después de emerger los iones proyectiles de la superficie de la lámina. Hay, de todos modos una distribución de emisión secundaria de electrones. Luego, los electrones que viajan con velocidades próximas a la del ión ven el campo del ión emergente, formándose el pico de los electrones convoy, observado.

Estudios más detallados, que incluyen las distribuciones en ángulo, de la forma de los picos de electrones convoy provenientes de blancos gaseosos y sólidos se realizan en el laboratorio de Colisiones Atómicas del CAB, usando iones livianos. Una extensión de estos estudios a iones pesados completaría substancialmente la información obtenible.

REFERENCIAS

1. G.B. Crooks y M.E. Rudd, Phys.Rev.Lett.25, 1599 (1970)
2. K.Dettmann, K.G. Harrison y M.Lucas, J.Phys.B7, 269 (1974)
3. F.Drepper y J.S. Briggs, J.Phys.B9, 2063 (1976)
4. W.Meckbach and R.A. Baragiola, Inelastic Ion-Surface Collisions, Academic Press, Inc. (1977)
5. R.W. Granage and M.W. Lucas, J.Phys.B9, 445 (1976)
6. K.C.R.Chiu, J.Wm.Mc Gowan and J.B.A.Mitchell, J.Phys.B11, L117 (1978)
7. J.Macec, Phys.Rev.A1, 235 (1970)
8. A.Salin, J.Phys.B2, 631 and 1255 (1969)
J.Phys.B5, 979 (1972)
9. M.Suter, C.R. Vane, J.A. Sellin, S.B. Elston, G.D. Alton, R.S. Thoe and R.Laubert, Phys.Rev.Lett.41, 399 (1978)
10. R.Shakeshaft and L.Spruch, Phys.Rev.Lett.41, 1037 (1978)
11. V.N.Neelavathie, R.H.Ritchie and W.Brandt, Phys.Rev.Lett.33, 302 (1974)
W.Brandt and R.H. Ritchie, Phys.Lett.62A, 374 (1977)
12. M.M.Duncan and M.G.Menendez, Phys.Rev.A13, 566 (1976)
13. R.Laubert, J.A. Sellin, C.R.Vane, M.Suter, S.B. Elston, G.D. Alton and R.S. Thoe, Phys.Rev.Lett.41, 712 (1978)
14. W.Meckbach, K.C.R. Chiu, H.H. Brongersma and J.Wm.Mc Gowan J.Phys.B10, 3255 (1977)
W.Meckbach, N. Arista and W.Brandt, Phys.Lett.65A, 113 (1978)
15. W.Meckbach, Informe Reunión de Estudio Bariloche I, 90 (1978)
H.D. Betz, Rev.Mod.Phys.44, 465 (1972)