

UN METODO SIMPLE PARA DETERMINAR LA IONIZACION  
CORRESPONDIENTE A LOS ELECTRONES SECUNDARIOS  
Y A LOS PROTONES EN UN EVENTO PROTONICO

D.A. Gagliardini y H. Karszenbaum

Centro Argentino de Estudios de Radiocomunicaciones  
y Compatibilidad Electromagnética  
Buenos Aires  
República Argentina

RESUMEN

Los electrones generados por interacción de protones con los componentes atmosféricos juegan un rol preponderante en los efectos producidos en eventos protonicos de altas energías. En este trabajo se presenta un modelo simple que permite separar en la ionización total producida en este tipo de fenómenos la contribución de los electrones generados y la correspondiente a los protones. Además se muestra como se obtiene el flujo de electrones en función de la altura y la energía a partir de la ionización producida por los mismos.

SUMMARY

The electrons generated in the interaction of protons with the atmospheric components play a fundamental role in the effects that followed a high energy proton event. A simple model that allows to separate from the total ionization produced, the contribution due to electrons and protons, is presented. The way of obtaining the fluxes of electrons as a function of height and energy, from the ionization rates, is also showed.

## INTRODUCCION

Un gran número de trabajos en los que se describen en forma detallada la interacción de los protones con los componentes atmosféricos, pueden ser encontrados actualmente en la literatura. Entre ellos: Eather (1967a, 1967b), Edgar y otros (1973, 1975), Sum (1972), Singh y otros (1978), Karszenbaum y Gagliardini (1980). Todas estas publicaciones muestran que los protones precipitados pueden generar importantes emisiones luminosas e incrementos en la ionización, concluyendo además que los electrones generados juegan un rol preponderante en estos procesos, en particular para eventos protónicos de altas energías. En algunos de estos trabajos, Eather (1967b), Edgar y otros (1973, 1975), Singh y otros (1978) sólo se presenta la distribución total de electrones secundarios creados a lo largo de la trayectoria de un protón en función de la energía. Karszenbaum y Gagliardini (1980), en cambio, presentan una descripción detallada del cálculo del flujo de electrones secundarios en función de la altura y la energía. Estos últimos autores hacen además una comparación de la importancia de la ionización de los electrones frente a la de protones para distintas energías de protones incidentes. Esto lo logran calculando el flujo de los electrones a partir de la ionización de los protones, estimando luego mediante este flujo la ionización correspondiente.

El objetivo de este trabajo es presentar un método simple el cual permite obtener a partir de la ionización total producida en un evento de protones, la ionización correspondiente a este tipo de partículas y a los electrones generados. Ello se logra mediante una combinación de los métodos presentados por Sum (1977), Edgar y otros (1975) con el desarrollado por Karszenbaum y Gagliardini (1980). Este nuevo modelo tiene la ventaja de permitir calcular la ionización correspondiente a los electrones sin cálculo previo del flujo de los mismos, evitándose de esta manera la parte más complicada de los cálculos y ahorrándose un importante tiempo de computación.

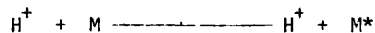
## CALCULO DE LA IONIZACION PRODUCIDA

Los procesos básicos por los cuales un protón pierde energía en su interacción con los componentes atmosféricos son perfectamente conocidos, pudiéndose expresar según las siguientes ecuaciones:

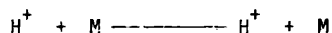
a) Ionización.



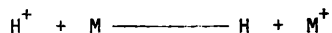
b) Excitación.



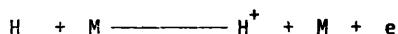
c) Choque Elástico.



d) Captura Electrónica.



e) "Stripping"



En estas expresiones M corresponde a los distintos componentes atmosféricos. Las ecuaciones d) y e) representan el proceso denominado intercambio de carga. En este caso el protón se transforma en un átomo de hidrógeno al adquirir un electrón, para luego perderlo y transformarse nuevamente en un protón. El átomo de hidrógeno generado de esta manera puede perder energía a lo largo de su trayectoria mediante los procesos a), b), c) y e).

El proceso de ionización es importante para energías superiores a 1 keV, mientras que el de excitación, intercambio de carga y choque elástico lo son para energías menores a aproximadamente 1 MeV, 100 keV y 1 keV respectivamente.

El proceso de intercambio de carga hace que el flujo inicial de protones se transforme luego en uno de protones y átomos de hidrógeno. En el estado de equilibrio las fracciones correspondientes están dadas por:

$$F_p(E) = \frac{\sigma_{01}(E)}{\sigma_{01}(E) + \sigma_{10}(E)} \quad F_H(E) = \frac{\sigma_{10}(E)}{\sigma_{01}(E) + \sigma_{10}(E)}$$

donde 0 y 1 representan el estado de carga,  $\sigma_{01}$  la sección eficaz de stripping y  $\sigma_{10}$  la sección eficaz de captura.

De acuerdo al método descrito por Edgar y otros (1975) y al presentado por Karszenbaum y Gagliardini (1980) el número total de iones de la componente atmosférica  $i$  producida por un flujo monoenergético de protones  $\phi_p$  de energía  $E$  a la altura  $h$  está dado por:

$$q_{i,T}(E,z) = \frac{\phi_p(E,z)}{\Delta E_I} \frac{d E_{I,i}}{d z} \quad (1)$$

donde T indica la ionización total, es decir la producida por protones más electrones,  $\Delta E_I$  es la energía promedio perdida por un protón al generar un ión, cuyo

valor es aproximadamente 35 eV. La derivada de  $E_{I,i}$  respecto de  $z$  representa la pérdida de energía del protón por unidad de camino al ionizar la componente  $i$ . Esta última se puede expresar en función de la función pérdida de energía  $L(E)$  y la densidad numérica de la componente  $i$ ,  $N_i(z)$ , de la forma siguiente:

$$\frac{d E_{I,i}}{d z} = - L_{I,i}(E) N_i(z) \quad (2)$$

Para el caso de protones de energía  $E$  incidiendo con un ángulo  $\theta$ , la partícula atraviesa una distancia  $z=h/\cos \theta$  por lo que:

$$\frac{d E_{I,i}}{d h} = - \frac{L_{I,i}(E) N_i(h)}{\cos \theta} \quad (3)$$

Por definición la función pérdida de energía se puede expresar como:

$$L_{I,i}(E) = (\Delta I_i + \langle T \rangle) (F_p(E) \sigma_{I,i}^P(E) + F_H(E) \sigma_{I,i}^H(E)) \quad (4)$$

donde  $I_i$  es el potencial de ionización promedio,  $\langle T \rangle$  la energía promedio del electrón saliente y  $\sigma_{I,i}^P$ ,  $\sigma_{I,i}^H$  las secciones eficaces de ionización para protones y átomos de hidrógeno respectivamente.

Teniendo en cuenta (2), (3) y (4), la ecuación (1) para el caso de un flujo de protones de incidencia vertical se puede expresar como:

$$q_{T,i}(E,h) = \frac{\phi_p(E,h) N_i(h) \times (\Delta I_i + \langle T \rangle) (F_p(E) \sigma_{I,i}^P(E) + F_H(E) \sigma_{I,i}^H(E))}{\Delta E_{I,i}} \quad (5)$$

De acuerdo al modelo presentado por Karszenbaum y Gagliardini (1980) el número de iones del componente atmosférico  $i$  creado solamente por protones de energía  $E$  a la altura  $h$  estará dado por:

$$q_{p,i}(E,h) = \phi_p(E,h) N_i(h) (F_p \sigma_i^P(E) + F_H \sigma_i^H(E)) \quad (6)$$

De (5) y (6) podemos obtener:

$$q_{p,i}(E,h) = \frac{\Delta E_{I,i}}{(\Delta I_i + \langle T \rangle)} q_{T,i}(E,h) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que la ionización producida por los electrones será la diferencia entre la total y la producida por protones, estará entonces dada por:

$$q_{e,i}(E,h) = \left(1 - \frac{\Delta E_{I,i}}{(\Delta I_i + \langle T \rangle)}\right) q_{T,i}(E,h) \quad (8)$$

De la misma manera pueden obtenerse las siguientes relaciones:

$$q_{T,i}(E,h) = \frac{(\Delta I_i + \langle T \rangle)}{\Delta E_{I,i}} q_{p,i}(E,h) \quad (9)$$

$$q_{e,i}(E,h) = \left(\frac{(\Delta I_i + \langle T \rangle)}{\Delta E_{I,i}} - 1\right) q_{p,i}(E,h) \quad (10)$$

De esta forma, según el modelo utilizado, conociendo  $q_{p,i}(E,h)$  se puede calcular  $q_{T,i}(E,h)$  o viceversa, además de la ionización producida por los electrones.

De las expresiones (7), (8), (9) y (10) se puede observar que el límite de validez de este método está dado para  $(\Delta I_i + \langle T \rangle) = \Delta E_{I,i}$  ya que para valores inferiores  $q_{T,i} < q_{p,i}$  y  $q_{e,i} < 0$ . Teniendo en cuenta que  $\Delta I_i = 20$  eV la relación de igualdad se cumple para energías de protones de 30 KeV lo que implica  $\langle T \rangle = 15$  eV. Estos valores hacen que el método sea perfectamente válido ya que para esas energías la producción de electrones secundarios es despreciable.

#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los valores de los potenciales de ionización, las secciones eficaces y las expresiones para obtener las energías promedio del electrón saliente se calcularon según Edgar y otros (1973, 1975).

Utilizando las expresiones (7) y (8) se calculó la ionización producida por protones de 0.3 MeV, 1 MeV, 3 MeV y 10 MeV y la correspondiente a los electrones secundarios producidos.

Los resultados de los cálculos realizados se presentan en la figura 1 donde también se ha representado los obtenidos en el método de Karszebaum y Gagliardini (1980). Se puede notar que ambos métodos dan resultados equivalentes, lo que permite concluir que el modelo presentado en este trabajo resulta muy útil en el análisis de los efectos de un evento protónico ya que lo hace en forma rápida y sencilla, con una gran economía en tiempo de computación y sin perder exactitud.

#### RECONOCIMIENTOS

La publicación del presente trabajo cuenta con la autorización de la Dirección del CAERCEM. El mismo corresponde a un proyecto del Programa Nacional de Radiopropagación.

#### BIBLIOGRAFIA

- Eather, R.H., 1967a: Secondary Processes in Proton Auroras; J. Geophys. Res.; 72, 1481.
- Eather, R.H., 1967b: Auroral Proton Precipitation and Hydrogen Emission; Res. Geophys., 5m 207.
- Edgar, B.C., Miles, W.T. y Green, A.E.S., 1973: Energy Deposition of Protons in Molecular Nitrogen and Applications to Proton Auroral Phenomena; J. Geophys. Res., 78, 6595.
- Edgar, B.C., Porter, H.S. y Green, A.E.S., 1975: Proton Energy Deposition in Molecular and Atomic Oxygen and Applications to the Polar Cap; Planet Sci., 23, 787.
- Karszenbaum, H. y Gagliardini, D.A., 1980: A method for proton interaction in the atmosphere including fluxes of generated electron; 23<sup>a</sup> Reunión Plenaria del COSPAR, Budapest, Hungría. (Aceptado para su publicación en Space Research).
- Singh Vir y Singhal, R.P., 1978: Intensities of N<sub>2</sub> Bands in Protons Induced Polar Cap Aurora; J. Geophys. Res., 83, 1653.

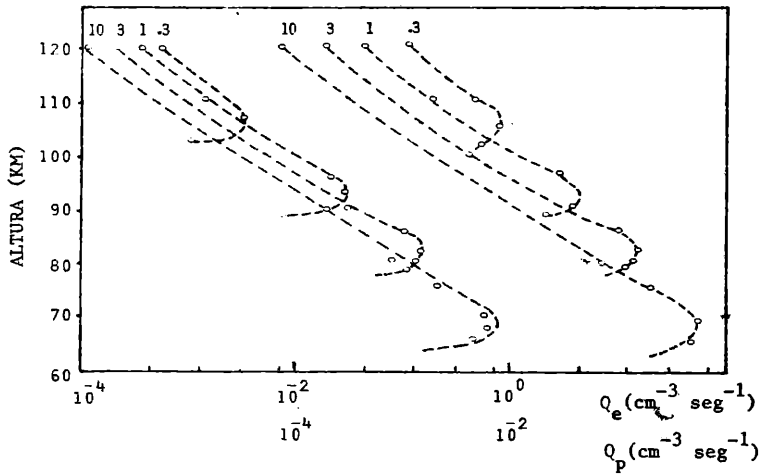


Figura 1

Resultados obtenidos mediante el método de Karszenbaum Gagliardini (1980) (⊙) y los obtenidos mediante el modelo presentado en este trabajo (-----)

Del costado derecho la ionización producida por protones precipitados con energías iniciales de 0.3 MeV, 1 MeV, 3 MeV y 10 MeV. Del costado izquierdo la correspondiente a los electrones generados.

