

ANALISIS DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE INTERACCION  
DE LOS ELECTRONES CON LOS COMPONENTES ATMOSFERICOS

Haydée Karszenbaum y Domingo A. Gagliardini

Centro Argentino de Estudios de Radiocomunicaciones  
y Compatibilidad Electromagnética

Buenos Aires  
República Argentina

RESUMEN

En este trabajo se hace un análisis de los diferentes procesos de interacción de los electrones con los componentes atmosféricos determinándose para cada energía cuáles son predominantes y cuáles pueden ser despreciados. Como resultado se obtiene un modelo simplificado de la degradación energética de los electrones que permite además un ahorro importante en tiempo de computación.

SUMMARY

An analysis of the different excitation processes by which electrons interact with the atmospheric components is presented. The energy ranges in which they predominate or they can be neglected are determined. As a result, a simplified model of the energy degradation of electrons is obtained that also implies a considerable reduction in the computing time.

## INTRODUCCION

Los electrones libres en la ionósfera son producidos por diferentes procesos de ionización de los componentes atmosféricos, entre los que se pueden mencionar los generados por partículas precipitadas. Los electrones así engendrados son llamados "secundarios", tienen energías superiores a la de los electrones térmicos y pueden perderla ya sea para excitación o por ionización. La importancia relativa de estos dos procesos depende de la energía que tenga la partícula en el momento de interactuar; para valores superiores a 100 eV prevalece la ionización mientras que para valores inferiores la excitación. Debido a la ionización producida por electrones secundarios se generan nuevos electrones libres llamados "terciarios", los que al no tener altas energías pierden la mayor parte de la misma por excitación, siendo por lo tanto despreciable la cantidad de electrones "cuaternarios" generados.

Numerosos autores han estudiado la producción de electrones en la atmósfera debido a la ionización de los componentes atmosféricos por parte de partículas precipitadas. Entre ellos se pueden mencionar: Rees y Jones (1973), Banks y otros (1974), Gagliardini y otros, (1976, 1980). Los primeros utilizan un método simple pero su aproximación de pérdida continua de energía, por parte de los electrones, hace que se pierda precisión y realidad física en las bajas energías. El método presentado por Banks y otros es el más completo ya que éste no sólo estudia el comportamiento de los electrones generados, sino también el de los primarios. Tiene además en cuenta la pérdida discontinua de la energía, pero su complejidad matemática lo hace de difícil uso y de mucho gasto de tiempo de computación. Gagliardini y otros (1976, 1980) presentan un método rápido y simple para calcular la producción de electrones teniendo en cuenta la pérdida discontinua de energía por parte de estas partículas.

El último trabajo mencionado es el que requiere menor tiempo de computación; no obstante ello, desde este punto de vista, aún puede ser mejorado. Efectivamente, en la degradación energética de los electrones participan un gran número de procesos de excitación donde la importancia relativa de los mismos varía según la energía de la partícula. Esto hace que no sea necesarios tenerlos a todos en cuenta para diferentes intervalos ya que si bien en uno un proceso puede ser preponderante, en otro puede ser totalmente despreciable. Las mejoras pueden ser obtenidas entonces mediante un estudio detallado de la contribución a la producción de electrones por parte de cada uno de los procesos de excitación. Este es el objetivo de este trabajo, lo que permitirá obtener un método aún más simple y rápido para calcular la producción y el flujo de electrones generados por las partículas precipitadas.

## PRODUCCION DE ELECTRONES SECUNDARIOS

Según Gagliardini y otros (1976) la producción de electrones secundarios en una determinada energía  $E_s$  y a una altura  $z$  se debe a la contribución de tres procesos diferentes.

a) Electrones primarios de energía  $E_p$  ionizan átomos y moléculas generando electrones secundarios de energía  $E_s$ . A ellos se referirá como "producción local" y serán expresados como  $n_{es,PL}(E_s, z)$ .

b) Electrones secundarios de energía superiores a  $E_s$  al ionizar átomos y moléculas, pierden parte de la energía quedando con  $E_s$ . Estos son los denominados "producción por ionización" y se expresan como  $n_{es,I}(E_s, z)$ .

c) Electrones secundarios de energía superiores, al excitar átomos y moléculas, pierden parte de la energía quedando con  $E_s$ . Estos son los denominados "producción por excitación" y se expresan como  $n_{es,Ex}(E_s, z)$ .

Matemáticamente, cada uno de estos componentes tienen las siguientes expresiones:

$$a) n_{es,PL}(E_s, z) = \frac{2}{\pi} \sum_i \left[ \frac{1}{\left[ E_i \left( 1 + (E_s/E_i)^2 \right) \right]} \frac{k_i N_i(z)}{\sum_i k_i N_i(z)} \right] Q(z)$$

donde  $E_i$  y  $k_i$  son constantes que dependen de cada uno de los elementos atmosféricos,  $N_i(z)$  indica la concentración de los mismos y  $Q(z)$  es la ionización a la altura  $z$ .

$$b) n_{es,I}(E_s, z) = \sum_i \sigma_{I,i}(E_s + \Delta E_i) N_i(z) \phi(E_s + \Delta E_i, z)$$

donde  $\sigma_{I,i}$  indican las secciones eficaces para cada proceso de ionización y  $\phi(E_s + \Delta E_i, z)$  el flujo de electrones secundarios para energías  $E_s + \Delta E_i$  y donde  $\Delta E_i$  es la energía promedio perdida por un electrón al generar un ión.

$$c) n_{es,Ex}(E_s, z) = \sum_i \sum_j \sigma_{Ex,ij}(E_s + \Delta E_{Ex,ij}) N_i(z) \phi(E_s + \Delta E_{Ex,ij}, z)$$

donde  $\sigma_{Ex,ij}$  son las secciones eficaces de excitación para el proceso  $j$  del elemento  $i$  y  $\phi(E_s + \Delta E_{Ex,ij}, z)$  los flujos de electrones secundarios en las energías mencionadas siendo  $\Delta E_{Ex,ij}$  las energías umbrales de los respectivos procesos.

Podemos observar que sólo la componente  $n_{es,PL}$  contribuye a las energías  $E_s$  con electrones que nacen en esa energía. Los otros dos procesos lo hacen con electrones que habiendo nacido con energías superiores aparecen en  $E_s$  por choques inelásticos con los componentes atmosféricos. Además, la contribución  $n_{es,PL}$  depende solamente del número total de iones  $Q(z)$  producidos por las partículas primarias mientras que  $n_{es,I}$  y  $n_{es,Ex}$  dependen de los valores de las secciones ef-

caces correspondientes y del flujo de los elementos secundarios en las energías  $E_S + \Delta E_{Ex,ij}$ . La ionización  $Q(z)$  se calcula de manera rápida y sencilla mediante el método de Wulff y Gledhill (1974). Los valores de las secciones eficaces se obtienen a partir de la expresión y parámetros dados por Banks y otros (1974). El valor del flujo se calcula considerando un estado de equilibrio en el cual la cantidad de electrones que desaparecen en un valor de la energía es igual a la que aparece en el mismo valor. Es decir:

$$\sum_i \sigma_{T,i}(E_S) N_i(z) \phi(E_S, z) = n_{es}(E_S, z)$$

siendo

$$\sigma_{T,i} = \sum_j \sigma_{Ex,ij}(E_S) + \sigma_{I,i}(E_S)$$

y

$$N_{es}(E_S, z) = n_{es,PL}(E_S, z) + n_{es,I}(E_S, z) + n_{es,EX}(E_S, z)$$

Los cálculos comienzan mediante la obtención de  $N_{es,PL}$  a partir del  $Q(z)$  en pasos de 1 eV, desde el valor 1 eV hasta la energía máxima  $E_{MAX}$  a la altura deseada. El valor del flujo se obtiene primero para  $E_{MAX}$  asumiendo que para ese valor las contribuciones  $n_{es,EX}$  y  $n_{es,I}$  son nulas o despreciables, es decir:

$$\phi(E_{MAX}) = \frac{n_{es,PL}(E_{MAX})}{\sum_i \sigma_{T,i}(E_S) N_i(z)}$$

Luego se continúa calculando para energías menores, también en pasos de 1 eV, teniendo en cuenta cada uno de los procesos de excitación que puedan ir contribuyendo. Los  $\Delta E_{Ex,ij}$  se los aproxima al valor del entero más próximo y son todos menores que  $\Delta E_I$ . A este último se le toma igual a 35 eV según Dalgarno y Griffing (1965). De esta manera para  $E_{MAX}-35$  eV todos los procesos contribuirán, inclusive los de ionización. Es decir, para calcular el valor del flujo en cada punto, habría que tener en cuenta 22 procesos diferentes.

#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los diferentes procesos de excitación considerados son presentados en la tabla 1 así como los parámetros para el cálculo de las secciones eficaces correspondientes de acuerdo a Banks y otros (1974).

Tomando todos los procesos se calculó el valor del flujo para diferentes casos, analizándose la contribución relativa de cada uno de ellos para distintos valores de la energía. A título de ejemplo se presenta en las figuras 1, 2, 3,

para cada uno de los componentes atmosféricos  $N_2$ ,  $O_2$ , y  $O$  respectivamente el aporte a la producción total de electrones  $N_{es}$  por parte de los distintos procesos de excitación, para el caso de un electrón incidente de energía 10 KeV y a una altura  $z = 125$  Km. En las mismas se puede observar para qué rangos de energías son importantes cada una de las contribuciones, pudiéndose notar que las que corresponden a los procesos  $b^1\pi_u$ ,  $b^1\Sigma_u^+$  y " $\Sigma$  Rydberg" de  $N_2$  y " $\Sigma$  Rydberg" de  $O_2$  lo son para todos los valores de energías en particular para energías superiores a 80 eV. Con los aportes de estos cuatro procesos se calculó el flujo  $\phi_1$  cuyos valores se han representado en la tabla 2. También se calculó el flujo teniendo en cuenta además:  $a^1\pi_g$  de  $N_2$ ,  $B^3\Sigma_u$  de  $O_2$  y  $^1D$ ,  $^1S$ , ( $\Delta l=1, \Delta s=0$ ) y ( $\Delta l=0, \Delta s=0$ ) de  $O$ , figurando en la tabla 2 como  $\phi_2$ ; con el fin de comparar se muestran también los valores de  $\phi$  para cuyo cálculo se han tenido en cuenta todos los procesos descritos en la Tabla 1. Se puede observar que la aproximación  $\phi_1$  es aceptable hasta aproximadamente 80 eV,  $\phi_2$  hasta 20 eV y evidentemente por debajo de esta energía es conveniente tener en cuenta todos los procesos.

El estudio realizado permite concluir que no es necesario considerar todos los procesos desde  $E_{MAX} = 35$  eV ya que se obtienen resultados equivalentes teniendo en cuenta solamente cuatro hasta 80eV, 10 hasta 20eV y el total de ellos para energías inferiores. Sabiendo que el valor de  $E_{MAX}$  varía entre 500 eV y 5.000eV dependiendo del tipo de partícula, protones o electrones, se puede afirmar entonces, que en el modelo descrito por Gagliardini y otros, (1976, 1980) se introducen importantes modificaciones al tener en cuenta las aproximaciones acá presentadas disminuyéndose además el tiempo de computación.

#### 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

- Banks, P.M., Chappell, C.R. y Nagy, A.F., 1974: A new model for the interaction of auroral electrons with the atmosphere: spectral degradation, backscatter, optical emission and ionization; J. Geophys. Res., 79, 1459.
- Dalgarno, A. y Griffing, G.W., 1965: Energy for ion pair for electron and proton beams in atomic hydrogen; Proc. Roy. Soc. London, Ser. A., 248, 415.
- Gagliardini, D.A., Karszenbaum, H. y Gledhill, J., 1976: A simple method for the estimation of the interaction of precipitated electrons with the atmosphere; including ionization and optical emission; Simposio sobre Física Solar Terrestre, Boulder, Colorado, EE.UU.

- Karszenbaum, H. y Gagliardini, D.A., 1980: A method for proton interaction in the atmosphere including fluxes of generated electrons; 23a Reunión Plenaria del COSPAR, Budapest, Hungría, (Aceptado para su publicación en Space Research).
- Rees, M.H. y Jones, R.A., 1973: The dependent Studies of the Aurora-II. Spectroscopic Morphology; Planet. Space Sci., 23, 1213.
- Wulff, A. y Gledhill, J.A., 1974: Atmospheric ionization by precipitated electrons; J. Atmos. Terr. Phys., 36, 79.

#### EPIGRAFES DE LAS FIGURAS Y TABLAS

- Fig. 1: Contribución de cada uno de los procesos de excitación del elemento  $N_2$  a la producción total de electrones secundarios  $N_{es}$ , para una altura de 125 km y un electrón incidente de energía igual a 10 KeV.
- Fig. 2: Contribución de cada uno de los procesos de excitación del elemento  $O_2$  a la producción total de electrones secundarios  $N_{es}$ , para una altura de 125 km y un electrón incidente de energía igual a 10 KeV.
- Fig. 3: Contribución de cada uno de los procesos de excitación del elemento O a la producción total de electrones secundarios  $N_{es}$ , para una altura de 125 km y un electrón incidente de energía igual a 10 KeV.

Tabla 1: Procesos de excitación y parámetros correspondientes.

Tabla 2: Comparación de los valores de los flujos a distintas energías a 150 Km de altura producidos por primarios a 10KeV y calculados por diferentes métodos.

TABLA 1

State	W, eV	A <sub>0</sub>	Ω	v	γ
N <sub>2</sub> A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	6.14	0.226	3.0	1.0	1.0
B <sup>3</sup> Π <sub>g</sub>	7.30	0.178	3.0	1.0	3.0
C <sup>3</sup> Π <sub>u</sub>	11.03	0.28	3.0	1.0	3.0
a <sup>1</sup> Π <sub>g</sub>	9.10	0.136	1.0	1.0	1.0
b <sup>1</sup> Π <sub>u</sub>	12.85	0.67	0.75	3	1.0
b <sup>1</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	14.0	0.33	0.75	3	1.0
ΣRydberg	13.75	2.66	0.75	3	1.0
vib W = 10	1.4	1.5x10 <sup>5</sup>	16	9	1.0
0 <sub>2</sub> a <sup>1</sup> Δ <sub>g</sub>	0.98	0.0005	3.0	1.0	3.0
b <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup>	1.64	0.0005	3.0	1.0	3.0
A <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub> <sup>+</sup>	4.5	0.021	0.9	1.0	3.0
B <sup>3</sup> Σ <sub>u</sub>	8.4	0.23	0.75	2.0	1.0
9.9 eV Allowed	9.9	0.08	0.75	3.0	1.0
ΣRydberg	13.5	2.77	0.75	3.0	1.0
vib	0.25	9.57x10 <sup>-4</sup>	0.90	1.0	1.0
0 <sup>1</sup> D	1.96	0.01	1.0	2.0	1.0
1 <sub>S</sub>	4.17	0.0042	1.0	1.0	0.5
3 <sub>S</sub>	9.53	0.0465	1.0	1.0	0.5
5 <sub>S</sub>	9.15	0.023	2.0	1.0	1.0
Σ(Δl = 1, Δs = 0)	14.2	0.367	0.75	3.0	1.0
Σ(Δs = 1)	14.7	0.694	2.0	1.0	1.0
Σ(Δl = 0, Δs = 0)	13.5	0.043	0.75	1.0	2.0

Tabla 2

$E_s$ (eV)	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi$
2	$0.668 \times 10^{-2}$	$0.250 \times 10^{-1}$	-	$0.465 \times 10^{-1}$
4	$0.147 \times 10^0$	$0.397 \times 10^0$	$0.250 \times 10^0$	$0.562 \times 10^0$
8	$0.220 \times 10^{-1}$	$0.296 \times 10^{-1}$	-	$0.346 \times 10^{-1}$
16	$0.120 \times 10^{-1}$	$0.142 \times 10^{-1}$	$0.146 \times 10^{-1}$	$0.156 \times 10^{-1}$
20	$0.872 \times 10^{-2}$	$0.987 \times 10^{-2}$	-	$0.105 \times 10^{-1}$
40	$0.127 \times 10^{-2}$	$0.135 \times 10^{-2}$	$0.139 \times 10^{-2}$	$0.137 \times 10^{-2}$
76	$0.371 \times 10^{-3}$	$0.386 \times 10^{-3}$	$0.392 \times 10^{-3}$	$0.389 \times 10^{-3}$
100	$0.251 \times 10^{-3}$	$0.260 \times 10^{-3}$	$0.263 \times 10^{-3}$	$0.261 \times 10^{-3}$
160	$0.140 \times 10^{-3}$	$0.144 \times 10^{-3}$	$0.145 \times 10^{-3}$	$0.145 \times 10^{-3}$
220	$0.932 \times 10^{-4}$	$0.961 \times 10^{-4}$	$0.967 \times 10^{-4}$	$0.963 \times 10^{-4}$
340	$0.442 \times 10^{-4}$	$0.455 \times 10^{-4}$	$0.458 \times 10^{-4}$	$0.456 \times 10^{-4}$
460	$0.139 \times 10^{-4}$	$0.142 \times 10^{-4}$	$0.142 \times 10^{-4}$	$0.142 \times 10^{-4}$

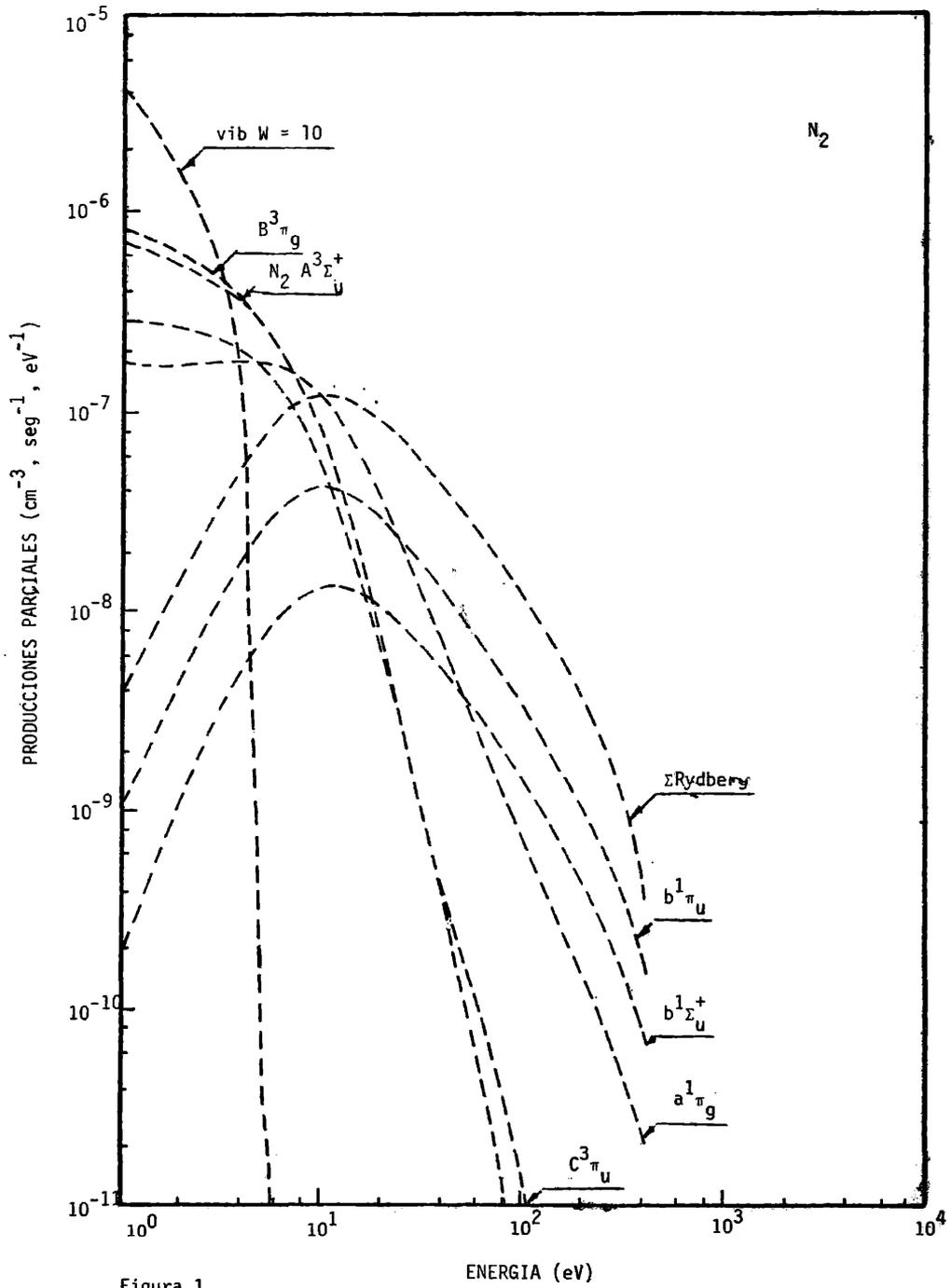


Figura 1

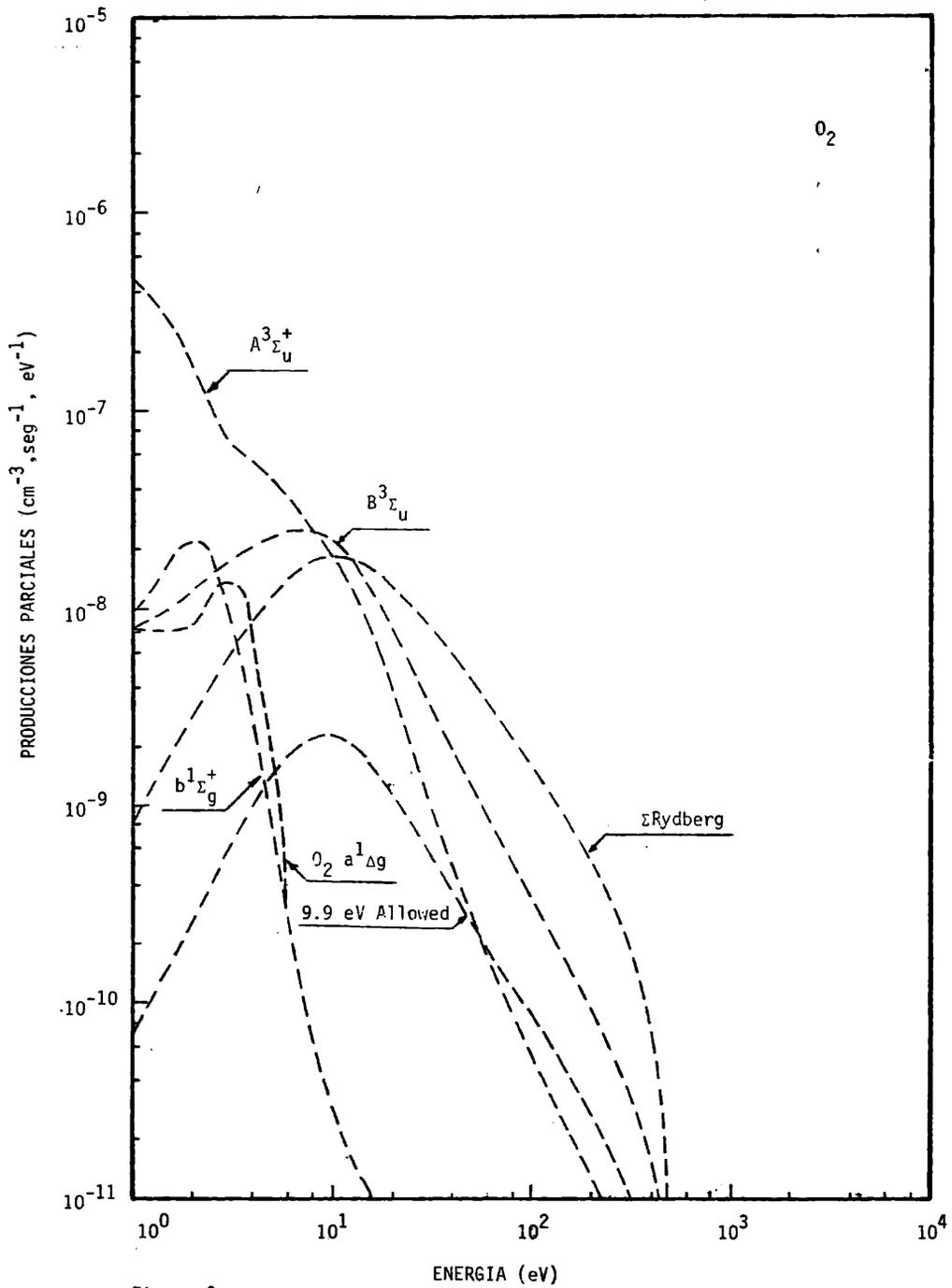


Figura 2

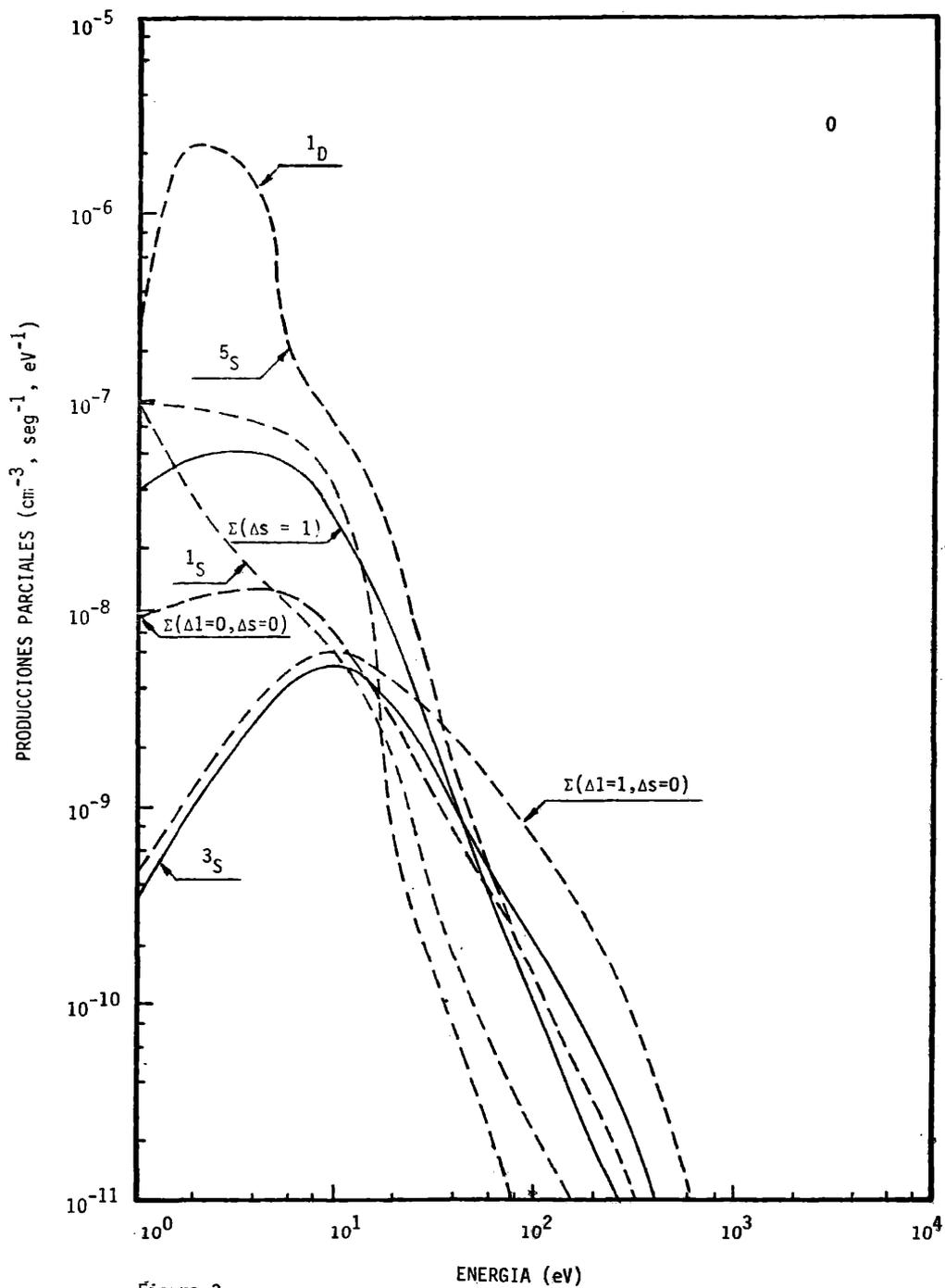


Figura 3

