

P. COLL

# EL INTERES DE LA MICRODOSIMETRÍA. UN CASO PARTICULAR: LA DOSIMETRÍA DE LOS ELECTRONES AUGER (\*)

## INTRODUCCIÓN

Es bien notorio el espectacular avance que, en los últimos 15-20 años, ha realizado esta nueva especialidad científica denominada Microdosimetría. Se trata de una rama de la ciencia que, aún habiendo nacido como una parte de la Dosimetría de las radiaciones ionizantes, cada vez se va convirtiendo en una especialidad mas autónoma. Tiene una característica destacable por su originalidad; es una especialidad que focaliza su atención en un ámbito en el que convergen la física de las radiaciones y la biología. Los fenómenos radiológicos que ocurren en esta interfase, a nivel celular, no son todavía suficientemente comprendidos y cuantificables por la ciencia moderna. El maridaje entre física y biología ha sido y sigue siendo difícil, especialmente por la complejidad de esta última cuando se sitúa a nivel molecular.

La Dosimetría clásica trabaja a escala macroscópica y se encarga de cuantificar los efectos de las radiaciones ionizantes en los tejidos y órganos de los seres vivos, mediante las magnitudes Dosis Absorbida y Dosis Equivalente o, mas modernamente, con la Dosis Efectiva, que pondera las dosis equivalentes a diversos órganos por sus factores de riesgo relativo respecto a la dosis recibida uniformemente a todo el cuerpo. Asimismo, la instrumentación utilizada para su medida (dosímetros) mide indirectamente los efectos en volúmenes macroscópicos.

Los avances de la radiología en las últimas décadas están demostrando que el problema básico a resolver, esto es, la cuantificación de los efectos biológicos producidos por las radiaciones ionizantes, es bastante complejo y que su resolución exige profundos conocimientos de la física de radiaciones y de la biología molecular. Para analizar esta problemática asociada a la disipación de energía por la radiación en pequeños volúmenes, a nivel micrométrico (tamaño celular) o incluso nanométrico (tamaño de la molécula de DNA de los cromosomas del núcleo celular), ha surgido la Microdosimetría. Esta moderna disciplina utiliza, en relación con

la dosimetría clásica, unas nuevas herramientas, entre las que destacan un conjunto de magnitudes definidas mediante variables aleatorias, unas especiales funciones de distribución, nuevos modelos matemáticos para relacionar el daño con la forma de disipación de la energía y un tipo especial de instrumentos de medida (los contadores proporcionales microdosimétricos), [1,2].

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), en su Publicación N° 60, (1990), [3], en el párrafo 18, al describir las magnitudes usadas en protección radiológica, dice: *"los futuros avances podrán demostrar que sería mejor utilizar otras magnitudes basadas en distribuciones estadísticas de eventos en un pequeño volumen de material correspondiente a las dimensiones de entidades biológicas, tales como el núcleo de la célula o su molécula de DNA"*. También la CIPR, en esta misma Publicación N° 60, al definir los factores de ponderación de la radiación (que permiten calcular la dosis equivalente en función de la dosis absorbida), los cuales dependen del tipo y energía de la radiación, en el párrafo 26, da una tabla con los valores recomendados de dichos factores, indicando que, para electrones, puede tomarse el valor  $w_R = 1$ , excepto para los *"electrones Auger"* emitidos por átomos ligados a la molécula de DNA. En este párrafo se indica textualmente: *"los electrones Auger emitidos por núcleos ligados al DNA presentan un especial problema, debido a que no es realista promediar la dosis absorbida sobre el conjunto de la masa del DNA, según debería hacerse a partir de la definición de la dosis equivalente (dosis promediada en un órgano o tejido). Los efectos de los electrones Auger deben ser determinados mediante técnicas de microdosimetría (ver Anexo B, párrafo B67)".* En este párrafo, B67, la C.I.P.R. señala la evidencia, puesta de manifiesto en las recientes investigaciones, de que los valores de la EBR (Eficacia Biológica Relativa) de los electrones Auger son considerablemente mayores que los de otros electrones, especialmente en aquellos casos en que los átomos que los

emiten están dentro de la célula. En el caso en que estos átomos no estén incorporados al DNA, en la bibliografía se citan valores  $EBR = 1,5 - 8$ , [4], y si lo están, valores mas altos,  $EBR = 20 - 40$ , [5].

Puede, pues, afirmarse que la dosimetría de los electrones Auger es un problema difícil, en el que todavía no se dispone de recomendaciones claras para la asignación de valores a los factores de ponderación de la radiación,  $w_R$ , y por tanto, para el cálculo de la dosis equivalente.

Es un problema típico de Microdosimetría. Veamos, a continuación, en que circunstancias aparece esta radiación en las aplicaciones prácticas y que valores de  $w_R$  pueden considerarse mas idóneos, a la luz de las investigaciones mas recientes.

## LA FÍSICA DE LOS ELECTRONES AUGER

El denominado *"efecto Auger"* es bien conocido en física atómica. Se trata de la emisión de electrones corticales de los átomos, como mecanismo de desexcitación, cuando en ellos, previamente, se ha creado alguna vacante electrónica. Producida la vacante, ésta se cubre con otro electrón y el átomo tiene dos mecanismos de desexcitación; o bien emitiendo un fotón (rayos X característicos o rayos fluorescentes) o bien emitiendo (expulsando) un electrón adicional de otra capa, denominado electrón Auger [6,7]. Algunos autores [8,9] postulan que la emisión de electrones por efecto Auger se realiza en dos etapas; tras cubrirse la vacante, se emite un rayo X (con una energía característica, que es la diferencia entre las de los dos niveles del electrón que la cubre), el cual, a continuación es reabsorbido por otro electrón (Auger), a modo de

(\*) La publicación de este artículo responde al acuerdo firmado entre la SNE y la Sociedad Española de Protección Radiológica, que incluye el intercambio de trabajos de interés para ambas sociedades.

efecto fotoeléctrico interno. No obstante, otros autores, [10], suponen que se trata de un proceso de una única etapa, debido a las energías observadas (como la transición  $K \rightarrow L_1$ ) en el espectro Auger, que corresponden a transiciones radiativas prohibidas.

Los procesos mas comunes en los que se producen vacantes en las capas electrónicas de los átomos son los siguientes:

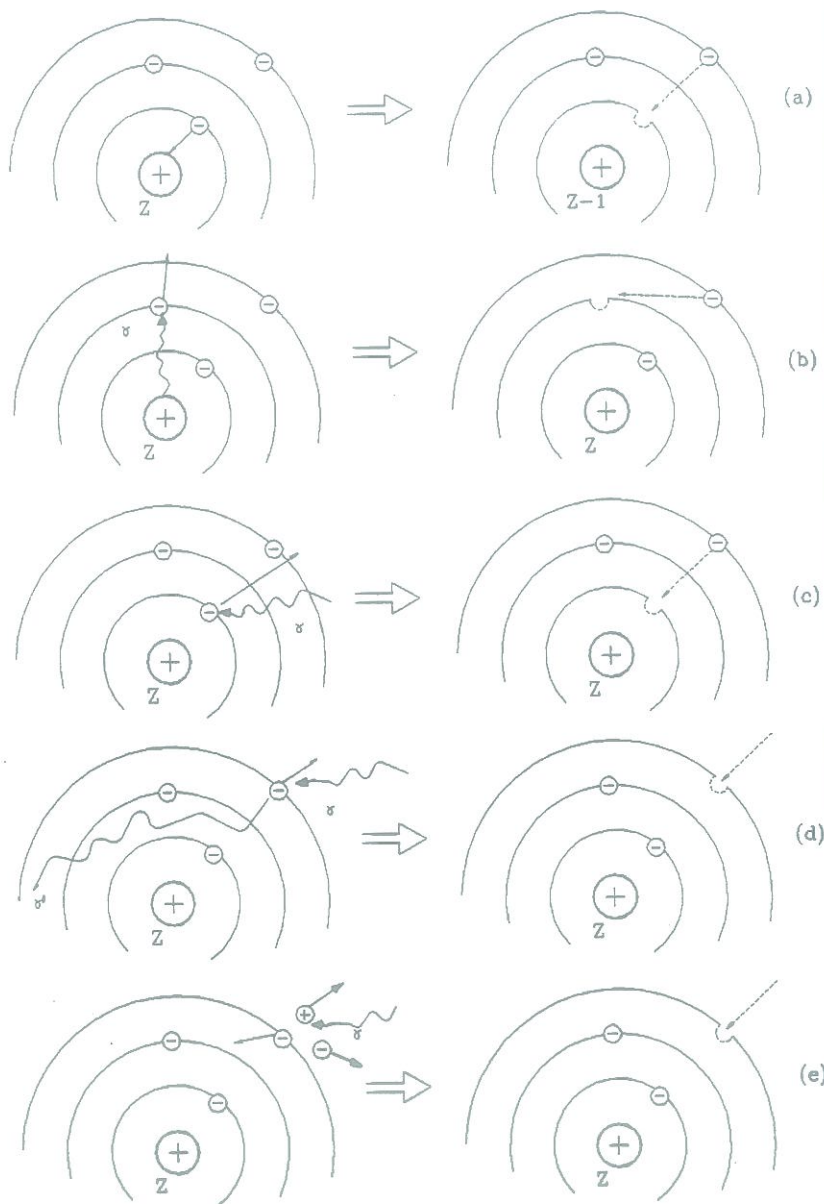
- Las desintegraciones de los átomos por captura electrónica.
- La conversión interna.
- El efecto fotoeléctrico.
- El efecto Compton.
- La producción de pares electrón-positrón en el campo eléctrico de un electrón ligado (tripletes).

En la Figura 1 se muestran esquemas ilustrativos de estos fenómenos, en el bien entendido que a las capas o niveles de energía electrónicos hay que darles su significado cuántico. Los dos primeros están ligados a procesos de desintegración radiativa y se dan, por tanto, en radionucleidos que presentan estos tipos de desintegración. Los otros tres están relacionados con los procesos de interacción de los fotones con la materia y, como es sabido, su probabilidad de ocurrencia depende de la energía de los fotones y de las características de los átomos del medio absorbente.

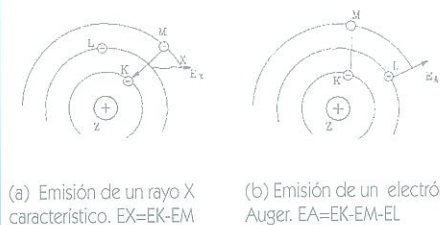
En todos los casos, tras la creación de una vacante electrónica en una capa o nivel cuántico, otro electrón, perteneciente a una capa menos ligada (o mas externa), podrá ocuparla, con lo

que el átomo pasa a un estado con una mayor energía de enlace. El exceso de energía (diferencia de los niveles energéticos del electrón que cubre la vacante), que se traduce en una desexcitación del átomo, puede disiparse de dos maneras, según se esquematiza en la Figura 11. O bien se emite un fotón (rayo X), con una energía igual a la diferencia de niveles energéticos del electrón antes de ocupar la vacante (saltos permitidos), o bien se emite otro electrón menos ligado del átomo, con una energía cinética igual a la diferencia de niveles menos la de enlace propia. Estos electrones son los denominados "electrones Auger", de importancia creciente en dosimetría, al tratarse de electrones con una pequeña energía cinética y, en consecuencia, con un alto valor de la transferencia lineal de energía, [11].

**F I-** Esquemas ilustrativos de los fenómenos de creación de vacantes electrónicas: a) captura electrónica, b) conversión interna, c) efecto fotoeléctrico, d) efecto Compton, e) producción de pares.



**F II-** Procesos de desexcitación del átomo tras cubrirse una vacante electrónica: a) emisión de un rayo X, b) emisión de un electrón Auger.



Se denomina "rendimiento de fluorescencia",  $\omega_i$  ( $Z$ ), a la relación

$$\omega_i(Z) = \frac{f_i(Z)}{v_i(Z)} \quad (1)$$

siendo  $f_i(Z)$  el número medio de fotones (rayos X fluorescentes) característicos, emitidos como consecuencia de  $v_i(Z)$  vacantes electrónicas creadas en la capa  $i$ -ésima (o subcapa) de un átomo de número atómico  $Z$ . En la referencia [11], (cap. 2), se dan las energías de las capas K y L (subcapas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ ), para átomos con  $31 \leq Z \leq 100$  y valores por encima de 10 keV.

Diversos autores han dado valores del rendimiento de fluorescencia para vacantes en la capa K,  $\omega_K$ , en función del número atómico  $Z$ , obtenidos experimentalmente o mediante modelos teóricos, [12]. Se ha propuesto, [13], la siguiente fórmula empírica:

$$\left( \frac{\omega_K}{1 - \omega_K} \right)^{1/4} = C_0 + C_1 Z + C_2 Z^2 + C_3 Z^3 = \sum_{i=0}^3 C_i Z^i, \quad (2)$$

que también puede escribirse en la forma

$$\omega_K = \frac{\left( \sum_{i=0}^3 C_i Z^i \right)^4}{1 + \left( \sum_{i=0}^3 C_i Z^i \right)^4} \quad (3)$$

Bambynek et al., [14], en un artículo de 1979, que posiblemente es el mas ampliamente referenciado al tratar del rendimiento de fluorescencia hasta la fecha, dieron unos valores de los

parámetros  $C_i$  de las fórmulas (2) y (3). Posteriormente, tras una reevaluación y comparación con numerosos datos experimentales, hecha en 1984,[15], han propuesto los siguientes valores:

$$\begin{aligned}C_0 &= 0,03730 \pm 0,0052 \\C_1 &= 0,03112 \pm 0,00044 \\C_2 &= (5,44 \pm 0,11) 10^{-5} \\C_3 &= -(1,250 \pm 0,070) 10^{-6}\end{aligned}$$

En la Tabla I se dan los valores del rendimiento de fluorescencia, obtenidos a partir de la fórmula (3), con estos valores de las constantes y para átomos con  $1 \leq Z \leq 100$ . Puede observarse como este rendimiento aumenta al crecer el número atómico, lo que significa que la probabilidad de emisión de electrones Auger por vacante,  $1 - \omega_K(Z)$ , disminuye al aumentar el número atómico, siendo, por tanto, un efecto importante sólo para los elementos ligeros.

Los rendimientos de fluorescencia medios para las vacantes electrónicas ocurridas en la capa L (subcapas  $L_1, L_2, L_3$ ),  $\bar{\omega}_L$ , pueden hallarse en las publicaciones de Cohen, [16], en las que se utiliza una fórmula empírica análoga a la (2), para  $37 \leq Z \leq 100$ , con unos valores de las constantes;

$$\begin{aligned}C_0 &= 0,177650 \\C_1 &= 0,00298937 \\C_2 &= 8,91297 \cdot 10^{-5} \\C_3 &= -2,677184 \cdot 10^{-7}\end{aligned}$$

calculados a partir del modelo teórico ECPSSR (Energy Loss Coulomb Deflection Perturbed Stationary State Relativistic Effects), elaborado por Brandt y Lapicki, [17], y de las secciones eficaces calculadas por Cohen y Harrigan, [18]. Para  $3 \leq Z \leq 36$ , se ha propuesto, [12], la fórmula:

$$\bar{\omega}_L = 1,9390 \cdot 10^{-9} \cdot Z^{3,8974} \quad (4)$$

En la Tabla I se dan los valores de  $\bar{\omega}_L$ , obtenidos utilizando estas constantes, para los elementos con  $3 \leq Z \leq 100$ .

Para el rendimiento de fluorescencia medio, por vacante, en la capa M,  $\bar{\omega}_M$ , se ha propuesto, [12], la siguiente expresión semiempírica:

$$\bar{\omega}_M = 1,29 \cdot 10^{-9} (Z-13)^4 \quad (5)$$

cuyos valores, para  $13 \leq Z \leq 100$ , se dan en la misma Tabla I.

## LA FRACCIÓN DE ENERGÍA ABSORBIDA EN EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

Como es sabido, en la fórmula fundamental de la dosimetría de fotones, [11], se utiliza el denominado "coeficiente másico de absorción de energía" de un medio,  $(\mu_{en}/\rho)$ , el cual engloba los correspondientes coeficientes para el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares, según;

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ef} + \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ec} + \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{pp} \quad (6)$$

Si, en primera aproximación (energías no muy elevadas), se desprecia la fracción de la energía cinética de los electrones secundarios dedicada a la generación de Bremsstrahlung (radiación de frenado), este coeficiente se calcula según,

**TI.** Valores del rendimiento de fluorescencia  $\omega_K$ ,  $\bar{\omega}_L$  y  $\bar{\omega}_M$ , para  $1 \leq Z \leq 100$ , obtenidos a partir de la formulación indicada en el texto.

| Z     | $\omega_K$ | $\bar{\omega}_L$ | $\bar{\omega}_M$ |
|-------|------------|------------------|------------------|
| 1 H   | 2.160 (-5) |                  |                  |
| 2 He  | 9.780 (-5) |                  |                  |
| 3 Li  | 2.828 (-4) | 1.39 (-6)        |                  |
| 4 Be  | 6.929 (-4) | 4.25 (-6)        |                  |
| 5 B   | .001409    | 1.01 (-5)        |                  |
| 6 C   | .002575    | 2.05 (-5)        |                  |
| 7 N   | .004349    | 3.74 (-5)        |                  |
| 8 O   | .006909    | 6.28 (-5)        |                  |
| 9 F   | .01045     | 9.93 (-5)        |                  |
| 10 Ne | .01519     | 1.50 (-4)        |                  |
| 11 Na | .02133     | 2.17 (-4)        |                  |
| 12 Mg | .02911     | 3.04 (-4)        |                  |
| 13 Al | .03872     | 4.15 (-4)        |                  |
| 14 Si | .05037     | 5.53 (-4)        | 1.29 (-9)        |
| 15 P  | .06422     | 7.24 (-4)        | 2.06 (-8)        |
| 16 S  | .08038     | 9.30 (-4)        | 1.04 (-7)        |
| 17 Cl | .09892     | .00118           | 3.30 (-7)        |
| 18 Ar | .1199      | .00147           | 8.06 (-7)        |
| 19 K  | .1432      | .00181           | 1.67 (-6)        |
| 20 Ca | .1687      | .00221           | 3.10 (-6)        |
| 21 Sc | .1962      | .00268           | 5.28 (-6)        |
| 22 Ti | .2256      | .00321           | 8.46 (-6)        |
| 23 V  | .2564      | .00381           | 1.29 (-5)        |
| 24 Cr | .2885      | .00450           | 1.89 (-5)        |
| 25 Mn | .3213      | .00527           | 2.67 (-5)        |
| 26 Fe | .3546      | .00614           | 3.68 (-5)        |
| 27 Co | .3880      | .00711           | 4.96 (-5)        |
| 28 Ni | .4212      | .00819           | 6.53 (-5)        |
| 29 Cu | .4538      | .00939           | 8.45 (-5)        |
| 30 Zn | .4857      | .0107            | 1.08 (-4)        |
| 31 Ga | .5166      | .0122            | 1.35 (-4)        |
| 32 Ge | .5464      | .0138            | 1.68 (-4)        |
| 33 As | .5748      | .0155            | 2.06 (-4)        |
| 34 Se | .6019      | .0174            | 2.51 (-4)        |
| 35 Br | .6275      | .0195            | 3.02 (-4)        |
| 36 Kr | .6517      | .0218            | 3.61 (-4)        |
| 37 Rb | .6744      | .0242            | 4.28 (-4)        |
| 38 Sr | .6956      | .0263            | 5.04 (-4)        |
| 39 Y  | .7155      | .0285            | 5.90 (-4)        |
| 40 Zr | .7340      | .0309            | 6.86 (-4)        |
| 41 Nb | .7512      | .0335            | 7.93 (-4)        |
| 42 Mo | .7672      | .0363            | 9.12 (-4)        |
| 43 Te | .7821      | .0393            | .00104           |
| 44 Ru | .7958      | .0425            | .00119           |
| 45 Rh | .8086      | .0459            | .00135           |
| 46 Pd | .8204      | .0495            | .00153           |
| 47 Ag | .8313      | .0534            | .00172           |
| 48 Cd | .8415      | .0575            | .00193           |
| 49 In | .8508      | .0618            | .00217           |

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot f \quad (7)$$

siendo  $\mu$  el coeficiente de atenuación de los fotones o sección eficaz macroscópica,  $\rho$  la densidad del medio y  $f$  la fracción de la energía de los fotones primarios incidentes que se transfiere a los electrones atómicos en forma de energía cinética inicial. Esta fracción de energía es la que la radiación primaria (fotones) imparte al medio, disipándose en el entorno del punto de interacción y, en consecuencia, es la que debe contabilizarse en el cálculo de la magnitud dosis absorbida.

Ciñiéndonos al caso de las interacciones de los fotones mediante efecto fotoeléctrico, se tendrá:

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ef} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{ef} \cdot f_{\tau} \quad (8)$$

Para determinar  $f_{\tau}(E_0, Z)$ , es decir, la fracción de energía que los fotones primarios, de energía  $E_0$ , ceden a los electrones de los átomos del medio, de número atómico  $Z$ , hay que tener presente las probabilidades respectivas de emisión de rayos X fluorescentes ( $\omega$ ), o de electrones Auger ( $1-\omega$ ) tras cubrirse la vacante generada. En la Figura III se esquematizan los dos procesos posibles. Evidentemente cuanto mayor sea el rendimiento de fluorescencia  $\omega$  mas pequeño será el valor de la fracción  $f_{\tau}$ . La formulación aproximada es, [12];

$$f_{\tau}(E_0, Z) \approx \left( \left( -\frac{\eta_i}{E_0} \right) + \frac{\eta_i}{E_0} \left( \frac{\eta_i \omega_i E_i - N_{i,i+1} \omega_{i+1} E_{i+1}}{\eta_i} \right) \right) =$$

$$= \left( \left( -\frac{\eta_i}{E_0} \right) + \frac{\eta_i}{E_0} \left( i - \frac{\omega_i E_i}{\eta_i} - \frac{N_{i,i+1} \omega_{i+1} E_{i+1}}{\eta_i} \right) \right), \quad (9)$$

siendo  $\eta_i$  la energía de enlace del electrón emitido en el efecto fotoeléctrico (capa i),  $E_i$  la energía media del rayo X fluorescente al cubrirse la vacante electrónica (capa i),  $\omega_i$  el rendimiento de fluorescencia y  $N_{i,i+1}$  el número medio de vacantes electrónicas creadas en la capa i+1 por cada vacante primaria originada en la capa i-ésima.

ma. El primer sumando de (9) es la fracción de energía del fotón transferida al electrón arrancado inicialmente y el segundo la fracción transferida a los electrones Auger.

Dado que si  $E_0 > E_K$  predominan los rayos X fluorescentes con la energía propia de la capa K y si  $E_L < E_0 < E_K$ , los de la capa L, etc., la expresión (9) puede simplificarse en la forma;

-para  $E_0 > E_K$  se tiene:

$$\left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{ef} \cdot f_{\tau} \approx \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{efK} \left( 1 - \frac{\omega_K \bar{E}_K}{E_0} \right), \quad (10)$$

o también

$$f_{\tau} \approx \frac{(\mu/\rho)_{efK}}{(\mu/\rho)_{ef}} \frac{\omega_K \bar{E}_K}{E_0}. \quad (11)$$

-para  $E_L < E_0 < E_K$ :

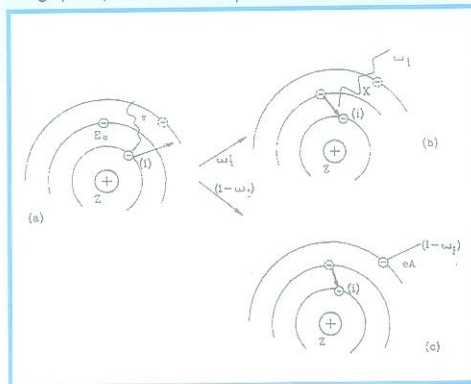
$$f_{\tau} \approx \frac{(\mu/\rho)_{efL}}{(\mu/\rho)_{ef}} \frac{\omega_L \bar{E}_L}{E_0}, \quad (12)$$

-para  $E_M < E_0 < E_L$ :

$$f_{\tau} \approx \frac{(\mu/\rho)_{efM}}{(\mu/\rho)_{ef}} \frac{\omega_M \bar{E}_M}{E_0}. \quad (13)$$

En la referencia [11], en el Cap. 2, se dan valores de las secciones eficaces microscópicas,  $\sigma_{ef}$ , del efecto fotoeléctrico para diversos elementos, en función de la energía de los fotones, así como expresiones empíricas para el cálculo de la relación  $\sigma_{ef} / \sigma_{efK}$  en función de Z, a partir de la cual puede obtenerse  $(\mu/\rho)_{ef} / (\mu/\rho)_{efK}$ .

**F III** - Procesos producidos tras un efecto fotoeléctrico: a) emisión de un fotoelectrón de la capa i, b) desexcitación mediante la emisión de rayos X fluorescentes, con probabilidad  $\omega_i$ , c) desexcitación con emisión de un electrón Auger, con probabilidad  $1-\omega_i$ .



## LA DOSIMETRÍA DE LOS ELECTRONES AUGER

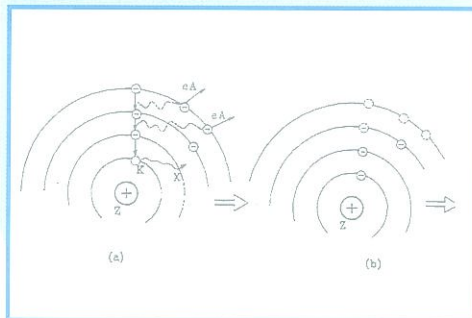
Existen varias razones por las cuales el efecto Auger está considerado modernamente como un aspecto de considerable interés en el ámbito de la dosimetría de las radiaciones ionizantes. En primer lugar hay que considerar las diversas fuentes existentes de este tipo de radiación:

- La creciente utilización de radionucleidos, que emiten altas proporciones de electrones Auger, en medicina nuclear (Tc-99, I-123, etc.).
- La existencia de radionucleidos naturales con emisión de electrones Auger (K-40).
- La existencia de radionucleidos artificiales con emisiones Auger, ya sea como consecuencia de las explosiones nucleares en la atmósfera o por su uso en las aplicaciones industriales (Fe-55, etc.).
- Los radionucleidos generados en el ciclo de producción de energía eléctrica en las centrales nucleares (Zn-65, I-125, etc.).

En segundo lugar, conviene indicar, [19], que, según se ha visto en el apartado 2, la probabilidad del efecto Auger,  $1-\omega_i(Z)$ , aumenta al disminuir el número atómico Z de los átomos invo-

| T II. Continuación |            |                  |                  |
|--------------------|------------|------------------|------------------|
| Z                  | $\omega_K$ | $\bar{\omega}_L$ | $\bar{\omega}_M$ |
| 50 Sn              | .8595      | .0665            | .00242           |
| 51 Sb              | .8676      | .0714            | .00269           |
| 52 Te              | .8750      | .0765            | .00298           |
| 53 I               | .8819      | .0820            | .00330           |
| 54 Xe              | .8883      | .0877            | .00365           |
| 55 Cs              | .8942      | .0938            | .00401           |
| 56 Ba              | .8997      | .100             | .00441           |
| 57 La              | .9049      | .107             | .00484           |
| 58 Ce              | .9096      | .114             | .00529           |
| 59 Pr              | .9140      | .121             | .00578           |
| 60 Nd              | .9181      | .129             | .00629           |
| 61 Pm              | .9220      | .137             | .00685           |
| 62 Sm              | .9255      | .145             | .00744           |
| 63 Eu              | .9289      | .153             | .00806           |
| 64 Gd              | .9320      | .163             | .00873           |
| 65 Tb              | .9349      | .172             | .00943           |
| 66 Dy              | .9376      | .182             | .0102            |
| 67 Ho              | .9401      | .192             | .0110            |
| 68 Er              | .9425      | .202             | .0118            |
| 69 Tm              | .9447      | .212             | .0127            |
| 70 Yb              | .9467      | .223             | .0136            |
| 71 Lu              | .9487      | .234             | .0146            |
| 72 Hf              | .9505      | .245             | .0156            |
| 73 Ta              | .9522      | .257             | .0167            |
| 74 W               | .9538      | .269             | .0179            |
| 75 Re              | .9553      | .281             | .0191            |
| 76 Os              | .9567      | .293             | .0203            |
| 77 Ir              | .9580      | .305             | .0216            |
| 78 Pt              | .9592      | .318             | .0230            |
| 79 Au              | .9604      | .331             | .0245            |
| 80 Hg              | .9612      | .343             | .0260            |
| 81 Tl              | .9625      | .356             | .0275            |
| 82 Pb              | .9634      | .369             | .0292            |
| 83 Bi              | .9643      | .382             | .0310            |
| 84 Po              | .9652      | .395             | .0328            |
| 85 At              | .9659      | .409             | .0347            |
| 86 Rn              | .9667      | .422             | .0366            |
| 87 Fr              | .9674      | .435             | .0387            |
| 88 Ra              | .9680      | .448             | .0408            |
| 89 Ac              | .9686      | .461             | .0430            |
| 90 Th              | .9691      | .474             | .0453            |
| 91 Pa              | .9696      | .486             | .0477            |
| 92 U               | .9701      | .499             | .0502            |
| 93 Np              | .9706      | .511             | .0528            |
| 94 Pu              | .9710      | .524             | .0555            |
| 95 Am              | .9713      | .536             | .0583            |
| 96 Cm              | .9717      | .548             | .0612            |
| 97 Bk              | .9720      | .560             | .0642            |
| 98 Cf              | .9722      | .572             | .0673            |
| 99 Es              | .9725      | .583             | .0706            |
| 100 Fm             | .9727      | .595             | .0739            |

**F IV - a) Cascadas de rayos X fluorescentes y de electrones Auger, b) creación de múltiples vacantes, con elevada ionización temporal del átomo.**



lucrados. Es, pues, un efecto que se hace importante cuantitativamente para los elementos ligeros, que son los mas abundantes en los tejidos biológicos (H, C, O, N, etc.).

En tercer lugar, los electrones Auger constituyen una radiación ionizante de energía bastante pequeña, inferior a la de enlace de la capa K del átomo. Esta energía varía desde 13,6 eV para el H hasta 115,6 keV para el U, siendo de 283,8 eV para el C, 401,6 eV para el N y 532 eV para el O. Los electrones con estas bajas energías poseen una alta transferencia lineal de energía (LET) y un alcance muy pequeño (algunos nanómetros), similar al de las partículas cargadas con energía del orden de 1 MeV. Estas elevadas transferencias lineales de energía se traducen en altas dosis absorbidas. Además, los elevados valores de la Eficacia Biológica Relativa (EBR) y del factor de ponderación de la radiación  $\omega_R$  (antes factor de calidad Q) se traducen en altos valores de las dosis equivalentes en el tejido biológico.

En cuarto lugar, cabe considerar un fenómeno adicional que contribuye a producir una alta ionización específica (LET) y, a la vez, a un profundo efecto sobre la estructura química de las moléculas del medio, rompiendo enlaces y, por tanto, dichas moléculas. Se trata de las "cascadas de rayos X" y de "electrones Auger", según se esquematiza en la Figura IV, tras las cuales, en un periodo de tiempo del orden de  $10^{-15}$  s., el átomo residual queda muy ionizado (pérdida de varias cargas negativas). Posteriormente, en el átomo se produce una redistribución y recolección de cargas, pero, si los electrones emitidos, que han creado las vacantes, forman parte del enlace químico con otros átomos, es muy probable que la molécula se rompa. Como es bien conocido, este es el origen del daño biológico producido por las radiaciones ionizantes, en especial, si la molécula afectada es la del DNA del núcleo de las células, cuya rotura de una o de sus dos ramas es la principal causa de los efectos estocásticos de las radiaciones.

Simultáneamente la cascada de electrones Auger de bajas energías (de pocos a algunos cientos de eV) produce una alta ionización (LET) en una pequeña zona vecina de los átomos emisores, la cual, en algunos casos, puede superar a la ionización específica producida por las partículas  $\alpha$ .

Si los procesos de emisión de electrones Auger son originados por desintegraciones radiactivas, como la captura electrónica o la conversión interna, los efectos se producen en forma de dosis internas, tal como ocurre en medicina nuclear o en casos de contaminaciones internas por incorporación de radionucleidos. Si los electrones Auger son creados por la interacción, en los tejidos u órganos, de fotones de campos de radiación externos, se trata de dosis producidas por irradiación externa.

Como se ha mencionado en el apartado 1, la C.I.P.R., en su Publicación N° 60, [3], ha apuntado la importancia de estos electrones en dosimetría, por sus potenciales efectos sobre la rotura de ramas de la molécula de DNA, pero no da guías ni recomendaciones para su cálculo.

Howell et al., [20], propone la siguiente metodo-

logía para el cálculo de la dosis equivalente, cuya fórmula general es ;

$$H_T = \sum_R \omega_R \bar{D}_{TR} \quad (14)$$

siendo  $H_T$  la dosis equivalente media en el tejido u órgano T,  $\bar{D}_{TR}$  la dosis absorbida media en dicho tejido y  $\omega_R$  el factor de ponderación del tipo de radiación R.

La fracción de la dosis equivalente en el órgano T, producida por los electrones Auger, en el caso de dosis internas, vendrá dado por:

$$\begin{aligned} H_{T,R(A)} &= (1 - f + f\omega_{R(A)}) \sum_{R(A)} \bar{D}_{T,R(A)} = \\ &= (1 + f(\omega_{R(A)} - 1)) \sum_{R(A)} \bar{D}_{T,R(A)} \end{aligned} \quad (15)$$

siendo  $R(A)$  la radiación constituida por los electrones Auger y  $f$  la fracción del radionucleido existente en el órgano asociada (ligada) al DNA. Esta expresión (15) equivale a desdoblarse la dosis equivalente en dos sumandos, uno de ellos, con la fracción  $1 - f$  y  $\omega_R = 1$ , es la debida a electrones Auger generados por átomos no ligados estructuralmente a la molécula de DNA y el otro, con la fracción  $f$  y  $\omega_R > 1$ , la debida a los átomos ligados al DNA. No obstante, resulta harto difícil medir o cuantificar, mediante experiencias radiobiológicas, los valores de  $\omega_{R(A)}$ , dada la dificultad de separar los efectos de los electrones Auger de los de otras radiaciones emitidas por los radionucleidos incorporados.

Humm et al., [21], de la American Association of Physicists in Medicine (AAPM), proponen los siguientes valores:

- $\omega_{R(A)} = 10$  para usos terapéuticos de la radiación (efectos deterministas).
- $\omega_{R(A)} = 20$  para los efectos estocásticos.

La fórmula (15) se basa en medidas experimentales realizadas con el radionucleido I-125, que se fija, mediante enlace covalente, a la molécula de DNA del núcleo celular. Cuando el radionucleido emisor de los electrones Auger no está enlazado covalentemente se esperan valores inferiores de la EBR, incluso en un factor 2 veces menor, y consiguientemente de  $\omega_{R(A)}$  y de las dosis equivalentes. En el caso en que los electrones son emitidos por átomos desde el exterior de la célula, la dosis es bastante inferior, ya que es mucho mas improbable que produzcan roturas en el DNA.

En la mayoría de las experiencias realizadas con I-125, [19], se ha empleado la sustancia lododeoxiridina (IUdR), que es químicamente

análoga a la Timidina y que se incorpora al DNA celular (cromatina). En estas experiencias, se han observado efectos biológicos similares a los producidos por las partículas  $\alpha$  de 5,3 MeV emitidas por el Po-210 en las células espermatozóidas del ratón. Por el contrario, utilizando el Tc-99m, en radiofármacos como el pertecnetato, pirofosfato e hidro-xileno difosfato, se ha observado una radiotoxicidad, es decir, un valor de la EBR similar a la de las radiaciones de baja L.E.T. ( $EBR \approx 1$ ).

En resumen, puede afirmarse que son varios los autores y publicaciones que tras las experiencias radiobiológicas realizadas, concluyen, que, en el caso que los radionucleidos emisores de electrones Auger se incorporen a la molécula de DNA, esta radiación produce efectos biológicos similares a las radiaciones ionizantes de alto LET (partículas  $\alpha$ , etc.). En la actualidad se están desarrollando complejos códigos de cálculo, [22], usando las técnicas de simulación de Monte Carlo, [11], en los que se tiene en cuenta los aspectos energéticos de emisión, las estructuras biomoleculares y las estructuras de las trayectorias y disposiciones de energía de los electrones en agua (Microdosimetría).

## LOS ELECTRONES AUGER EN MEDICINA NUCLEAR

Modernamente se constata un énfasis creciente en las aplicaciones médicas de los emisores de electrones Auger, tanto en diagnóstico como en terapia, en medicina nuclear. Los radionucleidos son administrados en una gran variedad de configuraciones químicas, lo que convierte el problema de la cuantificación de dosis y riesgos en un asunto complicado que va a requerir la realización de considerables trabajos experimentales y teóricos.

La elevada capacidad de ionización de los electrones Auger, produciendo una elevada dosis en un volumen pequeño, de forma muy localizada en una célula o una macromolécula en la vecindad del radionucleido emisor, es la principal razón de su uso en medicina nuclear. Se trata del ataque muy selectivo a determinadas células, o incluso a nivel subcelular o submolecular, denominado comunmente "cirugía molecular".

Los radionucleidos de mas interés en esta especialidad son: Cr-51, Fe-55, Ga-67, Se-75, Br-77, Br-80m, Tc-99m, In-110, In-111, In-114m, I-123, I-125, Sm-145, Pt-193m, Pt-195m, y Tl-201, [19]. El mas ampliamente utilizado es el I-125, que, con un periodo radiactivo de 60 días y desintegración por captura electrónica, convirtiéndose en Te-125, emite una media de 20 electrones Auger en cada desintegración. La gran mayoría de estos electrones poseen energías inferiores a 1 keV y, por tanto, depositan su energía en alcances comprendidos entre 1 y 125 nanómetros. Se trata, pues, de una deposición de energía en volúmenes y zonas muy selectivas, con dosis despreciables en las zonas vecinas.

La selección adecuada de los radiofármacos para poder determinar la localización subcelular y distribución de los emisores y el cálculo de las dosis equivalentes a los diversos órganos o tejidos afectados son aspectos de estas aplicaciones de

la medicina nuclear que requieren investigación en la actualidad.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

- Los fenómenos de deposición de energías en los tejidos biológicos por los electrones Auger se producen a nivel micrométrico o nanométrico y constituyen, por tanto, un típico problema de microdosimetría, moderna rama científica que estudia los efectos de las radiaciones ionizantes a nivel celular o subcelular. El interés del estudio de estos fenómenos estriba en prevenir los riesgos de este tipo de radiación y en proporcionar las bases de su buen uso en medicina nuclear, tanto en diagnóstico, como en terapia.
- Si los electrones Auger se emiten por radionucleidos en sus desintegraciones (captura electrónica, conversión interna), habrá que tener en cuenta las dosis internas producidas, en caso de incorporación, casual o deseada, de los mismos. Si estos electrones son producidos por interacción de un campo de fotones (efecto fotoeléctrico, etc.) sobre determinados átomos, habrá que considerar las dosis producidas en los tejidos por irradiación externa.
- Son varios los organismos internacionales -la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), el British National Radiological Board (NRPB), el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (CCNUERA) y la American Association of Physicists in Medicine (AAPM)- que consideran que, en caso de incorporaciones de emisores de electrones Auger, el factor de ponderación de la radiación,  $w_R$ , (antes factor de calidad Q) de estos no puede tomarse igual a la unidad, como en el resto de electrones. Es una radiación con elevada LET, que, en algunos casos, puede ser tan dañina como las partículas  $\alpha$ . Para los electrones Auger generados por irradiación externa, a falta de mejores conocimientos, puede seguir tomándose  $w_R=1$ .
- En ausencia de recomendaciones concretas acerca de los valores de  $w_R$  de los electrones Auger, los valores entre 1 y 20, indicados en este texto, pueden considerarse como una buena práctica. Asimismo proponemos la fórmula (15) como la más apropiada, a la vista de los conocimientos actuales, para el cálculo de las dosis equivalentes, lo que, implica conocer la fracción del radionucleido ligada a la molécula de DNA.
- Los valores recomendados de los Límites de Incorporación Anual (L.I.A.) de los diversos radionucleidos por la CIPR, [23], o los más recientes valores de los Factores Dosimétricos, [24], es decir, las dosis efectivas comprometidas por unidad de actividad incorporada de un radionucleido, deben usarse con precaución, cuando se trate de emisores de electrones Auger, ya que, en su cálculo, no se han tenido en cuenta los valores  $w_R > 1$ . Este hecho es importante, ya que puede dar lugar a grandes errores en el cálculo de las dosis internas producidas por estos radionucleidos (In-111, I-123, I-125, Tl-201, etc.).
- Por la importancia del tema, tanto en determinación de dosis debidas a incorporaciones ac-

cidentales o en los usos de la medicina nuclear, es necesario llevar a cabo investigaciones a nivel experimental y teórico, mediante simulaciones matemáticas, para conocer con mas detalle el riesgo de daño biológico producido por los electrones Auger.

## REFERENCIAS

- [1] Pla, C. "Aportacions a l'Anàlisi Física i Estadística dels Fenòmens d'Integració de la Radiació i de les Magnituds i Conceptes Utilitzats en Microdosimetria". Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, (1996).
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurements. "Microdosimetry". I.C.R.U. Report 26. 7910 Woodmont Avenue. Bethesda Maryland. USA, (1983).
- [3] International Commission on Radiation Protection. "1990 Recommendations of the International Commission on Radiation Protection" (Oxford: Pergamon Press), ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3), (1991).
- [4] Kassis, A. I., Havell, R. W., Sastry, K. S. R. y Adelstein, S. J. "Positional Effects of Auger decays in mammalian cells in culture". En: DNA Damage by Auger Emitters, p.p. 1-13, editado por K. F. Baverstock y D. E. Charlton. Taylor and Francis. London, (1988).
- [5] Chan, G. L. y Little, J. B. "Neoplastic Transformation in Vitro". Radiation Carcinogenesis, p.p. 108-136, editado por A. C. Upton, R. E. Albert, F. E. Burns. R. E. Shore. Elsevier. Amsterdam, (1986).
- [6] Barkla, C. G. "On X Rays and the Theory of Radiation". Phil. Trans. Roy. Soc. 315-360. London A 217, (1917).
- [7] Auger, P. "Sur l'Effect Photoélectrique Composé". Journal de Physique et le Radium 6, 205-208, (1925).
- [8] Compton, A. H. y Allison, S. K. "X-Rays in Theory and Experiment" 2ª ed., p.p. 477-492. Van Nostrand, (1935).
- [9] Tertian, R. y Claissie, F. "Principles of Quantitative X-Ray Fluorescence Analysis", p.p. 12-14. Heyden, (1982).
- [10] Dyson, N. A. "X-Rays in Atomic and Nuclear Physics", p.p. 78-81. Longman, (1973).
- [11] Coll, P. "Fundamentos de Dosimetría Teórica y Protección Radiológica". Ediciones Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, (1990).
- [12] Hubbell, J. H. "Bibliography and Current Status of K, L, and Higher Shell Fluorescence Yields for Computations of Photon Energy-Absorption Coefficients". Informe NISTIR 89-4144. U. S. Department of Commerce. National Institute of Standards and Technology. Center of Radiation Research. Gaithersburg, MD 20899, (1989).
- [13] Burhop, E. H. S. "Le Rendement de Fluorescence". Journal de Physique et le Radium 16, 625-629, (1955).
- [14] Bambynek, W., Crasemann, B., Fink, R. W., Freund, H. U., Mark, H., Swift, C. D., Price, R. E. y Rao, P. V. "X-Ray Fluorescence Yields Auger and Coster-Kronig Transition Probabilities". Rev. Mod. Phys. 4, 716-813, (1972).
- [15] Bambynek, W. "A New Evaluation of K-Shell

Fluorescence Yields". En: Proc. X-Ray and Inner-Shell Processes in Atoms, Molecules and Solids. Leipzig. Aug., 20-24, (1984).

[16] Cohen, D. D. "Average L-Shell Fluorescence Yields". Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. (Netherlands) B.22, 55-58, (1987).

[17] Brandt, W. y Lapicki, G. "L-Shell Coulomb Ionization by Heavy Charged Particles". Phys. Rev. A 20, 465-480, (1979).

[18] Cohen, D. D. y Harrigan, M. "K-and L-Shell Ionization Cross Sections for Protons and Helium Ions Calculated in the ECPSSR Theory". Nucl. Data Tables 33, 255-343, (1985).

[19] Persson, L. "A New Problem in Radiation Protection: The Auger Electron Effect". En: International Physics Radiation Society Bulletin, Vol 9, Nº 2, 7-11, (1995).

[20] Howell, R. W., Narra, V. R., Sastry, K. S. R. y Rao, D. V. "On the Equivalent Dose for Auger Electrons Emitters". Radiat. Res. 134, 71-78, (1993).

[21] Humm, J. L., Howell, R. W. y Rao, D. V. "Dosimetry of Auger-Electron-Emitting Radionuclides". En: Report Nº 3 of AAPM Nuclear Medicine Task Group Nº 6. Med. Phys. 21, 1901-1915, (1994).

[22] Pomplum, E. y Terrisol, M. "Low-energy electrons inside active DNA models: a tool to elucidate the radiation action mechanisms". Radiat. Environ. Biophys. 33, 279-292, (1994).

[23] International Commission on Radiation Protection. "Limits for Intakes of Radionuclides by Workers". (Oxford: Pergamon Press) ICRP Publication 30. Parte 1 (1978): partes 2 y 3, (1980).

[24] International Commission on Radiation Protection "Dose Coefficient for Intakes of Radionuclides by Workers". Replacement of ICRP Publication 61 (Oxford: Pergamon Press) ICRP Publication, 68, (1994).



Pedro COLL BUTÍ, Doctor Ingeniero Industrial, es Profesor de la Universidad Politècnica de Catalunya e Ingeniero de C.N. Vandellós II. Es miembro de la Junta Directiva de la SNE.