

**MEDICINA, CIENCIAS BIOLÓGICAS, PSICOLOGÍA**

## RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS

por LUIS M. BORRERO (Del Instituto Nacional de Rádium)

Los círculos formados en el agua por la caída de una piedra han sido y seguirán siendo traídos a cuento toda vez que se quiera hablar de radiaciones; el fenómeno es tan objetivo y comprensible, que no hemos de esquivar el ejemplo, aun cuando él sea ya más que manido y aunque al traerlo a colación en este momento vayamos a recordar nociones bien sabidas, pero conocidas desde hace tanto tiempo que ya están en camino de olvidarse; las recordamos porque son indispensables para comprender este tema.

Lo que nos interesa hacer notar en este caso es lo siguiente: la conmoción producida por la piedra en la superficie del agua se propaga bajo la forma de una pequeña cresta circular cuyo radio va creciendo mientras el tiempo corre; mas, si observamos bien, veremos que detrás de la cresta viene un valle y que los dos marchan unidos de modo inseparable.

Pero si no es ya uno, sino que son varios los círculos concéntricos, podremos observar que cimas y valles alternan regularmente, de manera que tras una cima viene un valle, al que sigue otra cresta sucedida por la correspondiente sima...

Notemos que:

1)—Los círculos traducen la *propagación* de una turbación local.

2)—Esa propagación se realiza con una *velocidad definida*.

3)—La perturbación se propaga bajo la forma de una cadena de crestas y valles sucesivos. A esta manera de propagación, en que el fenómeno *irritativo* local alcanza sucesivamente porciones del medio cada vez más distantes del punto de origen de la turbación y las hace oscilar alrededor de una posición media de equilibrio, que es el nivel del agua (puesto que pasan por el apex de las crestas y por lo más hondo de los valles), a esta

manera de propagación —decimos— se la llama *propagación ondulatoria* y se denomina *onda* al conjunto formado por una cresta y por un valle.

La distancia que separa el comienzo de la cresta del punto en donde termina el valle (igual a la que separa dos cimas sucesivas o el fondo de dos valles vecinos, se denomina *longitud de onda* y se indica con la letra griega  $\lambda$  (lambda).

Si se hiere la superficie del agua repetidas veces y con un cierto ritmo, aparecerán círculos concéntricos separados unos de otros por una cierta distancia, es decir, ondulaciones de una cierta longitud de onda. Acelerando el golpeteo, los círculos saldrán más apretados, más vecinos unos de otros, es decir, se producirán ondas de longitud más corta. Es fácil ver que en uno y otro caso, las ondas se propagan siempre con la misma velocidad, independientemente de su longitud. Esto nos lleva a concluir que *en un determinado medio pueden propagarse ondas de longitud diversa, con velocidad idéntica*. Se observa además otro hecho importante: *La longitud de onda decrece cuando el número de ondas por segundo (frecuencia) aumenta*; estos dos valores —cada uno de los cuales es capaz de caracterizar por sí solo la onda en referencia— varían en sentido inverso: a mayor frecuencia menor longitud de onda, y viceversa, es decir, que dichas magnitudes son función inversa una de otra, cosa que se expresa por la fórmula

$$V = \lambda \cdot f$$

en que  $V$  = velocidad de propagación;  $\lambda$  (lambda) = longitud de onda y  $f$  = frecuencia.

Se demuestra fácilmente en física que el sonido es otro fenómeno ondulatorio, sólo que aquí el medio que vibra puede ser cualquiera (sólido, líquido o gaseoso). Pero a propósito del sonido hallamos algo bastante interesante: una cuerda tensa produce una determinada nota cuando se la pulsa; si la cuerda es gruesa y su tensión pequeña, podremos darnos cuenta de que su vibración es relativamente lenta, al tiempo que escucharemos una nota grave, de tonalidad baja.

Templando más la cuerda, la vibración se acelera hasta hacerse imposible de percibir visualmente, con lo que coincide una elevación del tono de la nota producida; se comprende, pues, que las notas altas son las de mayor frecuencia; ahora bien, ¿quién no ha notado que las notas altas, los sonidos agudos, se oyen a mayor distancia que los graves? Tan se ha notado esto que los

| $\mu = 1/1000 \text{ m}$<br>$\lambda \theta = 1/10,000,000 \text{ m}$<br>$\lambda \theta \theta^\circ \text{ a partir del infrarojo}$<br>$\vee \theta \theta \text{ Kilovolts a partir del}$<br>$\text{limite de voltajes intermedios}$ | Longitud<br>de onda   | Voltaje de<br>producción   | Longitud<br>de onda                         | Para fotografía | Calorificación | Acción física | Efecto de<br>radiación | Efecto químico | Efecto biológico | Efecto fisiológico |
|---|---|--|---|-----------------|----------------|---------------|------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| Rayos Còsmicos<br><br>Blatidos (pepe<br>tracción de esp.<br>límites de Pa.  | ?   | Energías del orden de<br>10 <sup>9</sup> y hasta 10 <sup>10</sup> electron<br>v. | <b>CHARRRONES</b><br>Seguridad<br>de grande | ?               | ?              | ?             | ?                      | ?              | ?                | ?                  |
| "Ultra-γ" (Desintegraciones<br>nucleares por protone<br>s)<br><br>Rayos γ<br>Rayos X<br>Rayos Ducky<br>X interm<br>Ultravioleta<br>Lejano<br>Próximo<br>Lux blanca<br>Infrarojo<br>Lejano   | 0.019<br>0.069<br>0.19<br>1.9<br>2.59<br>1369<br>2900<br>3900<br>4000<br>7700<br>343<br>μ | 12000<br>210 KV<br>123 KV<br>12.36<br>3.1<br>1 KV<br>123 K<br>435K               | <b>CHARRRONES</b><br>Seguridad<br>de grande | ?               | ?              | ?             | ?                      | ?              | ?                | ?                  |
| Duros (penetra<br>ción de miles<br>de pies)<br><br>Blatidos (pepe<br>tracción de esp.<br>límites de Pa.   | ?   | Energías del orden de<br>10 <sup>9</sup> y hasta 10 <sup>10</sup> electron<br>v. | <b>CHARRRONES</b><br>Seguridad<br>de grande | ?               | ?              | ?             | ?                      | ?              | ?                | ?                  |
| Duros (penetra<br>ción de miles<br>de pies)<br><br>Blatidos (pepe<br>tracción de esp.<br>límites de Pa.   | 0.019<br>0.069<br>0.19<br>1.9<br>2.59<br>1369<br>2900<br>3900<br>4000<br>7700<br>343<br>μ | 12000<br>210 KV<br>123 KV<br>12.36<br>3.1<br>1 KV<br>123 K<br>435K               | <b>CHARRRONES</b><br>Seguridad<br>de grande | ?               | ?              | ?             | ?                      | ?              | ?                | ?                  |

silbatos de locomotora y los pitos de fábrica dan siempre tonos altos porque es del mayor interés que se oigan a lo lejos. Así, pues, para el sonido al menos, las vibraciones de mayor frecuencia y menor longitud de onda (tonos altos) son las más penetrantes, es decir, las que pasan a través de mayores masas de aire.

Los círculos formados en el pozo existen solamente cuando existe el agua, y los sonidos implican la presencia de un medio conductor, que es de ordinario el aire. Hay otras ondas, otros fenómenos vibratorios, que no requieren un medio como el agua o el aire para propagarse: tal es la luz, que llega a nosotros después de haber cruzado los vacíos siderales y propagándose a través del *espacio* (entendido en el sentido einsteineano) o del tan inasible como criticado éter de los físicos del siglo XIX; de todos modos, la luz es una vibración que se propaga a través de espacios vacíos de materia: a los fenómenos vibratorios capaces de tal propagación se les denomina *radiaciones electromagnéticas* o más abreviadamente *radiaciones*. Cabe advertir que los medios materiales son capaces de transmitir estas formas de energía que —por otra parte— se van degradando y transformando en otras a medida que cruzan dichos medios; en las páginas que siguen echaremos una ojeada general sobre las acciones principales de las diversas radiaciones, prescindiendo de detalles y limitándonos a considerar aquellas acciones que permiten establecer comparaciones entre los diversos tipos de rayos.

#### I— LA LUZ

Decir, como dijimos, que la luz es *una* vibración, es inexacto: todos sabemos que fue Newton quien descubrió que el prisma descompone la luz del sol en siete colores, es decir, en siete tipos de vibración diversos.

Pero aún decir que la luz del sol está integrada por siete tipos de vibraciones no es exacto porque no hay cambio brusco al pasar del rojo al naranja, ni de éste al amarillo, etc., sino que existen gradaciones insensibles; sabiendo que las ondas que dan la sensación de color rojo son la de mayor longitud y que los rayos violeta son los de onda más corta, podemos expresar el hecho diciendo que la luz blanca está constituida por infinidad de radiaciones diversas, cuya longitud de onda se escalona entre los 8000 A° (color rojo) y los 4000 A° del color violeta (el Angstrom es igual a 1/10 000 000 de mm y se representa por la letra A°).

Lo que permite llamar *luz* a tales radiaciones es su acción sobre la retina, es decir, la producción de sensación luminosa. Vale advertir que la visibilidad disminuye a medida que se avanza en el violeta hacia las radiaciones más cortas, llegando un momento en que dicha sensación deja de producirse; este límite varía ligeramente con los individuos; lo interesante es notar que no hay una separación demasiado neta entre el violeta y las radiaciones de ondas más cortas que la luz. Algo análogo puede decirse en referencia al rojo y las radiaciones de onda mayor que la suya.

Esa luz tiene los siguientes efectos principales:

a) Físicos: Provoca la fluorescencia de algunos cuerpos (fluoreceína, por ejemplo); no es éste un carácter especialmente marcado.

Descarga los electros copios porque ioniza el aire (efecto fotoeléctrico): tampoco es éste un carácter especialmente marcado pero sí se va haciendo más notorio a medida que se pasa gradualmente del rojo hacia el violeta.

b) Químicos: Impresiona la placa fotográfica: también esto es más marcado del lado del violeta.

c) Biológicos: Aparte de la acción clorofílica y concretándonos desde ahora a la acción sobre los animales, consideraremos solamente:

1—Acción sobre la piel: “Siempre que una parte de la superficie del cuerpo es expuesta a una luz intensa, se produce un eritema conocido bajo la denominación de quemadura por el sol o actinodermatitis.”

“En los momentos que siguen a la irradiación el sujeto experimenta una sensación de calor y comezón. Después de un período latente de 4 a 12 horas, aparece el eritema que puede no durar sino algunos días en las formas ligeras. En los casos en que la acción de la luz ha sido más intensa, se ven aparecer flictenas que evolucionan hacia una necrosis superficial de los tegumentos. Luégo sobreviene una descamación por colgajos epiteliales, seguida de una pigmentación de la piel que puede persistir durante un tiempo bastante largo, varios meses, por ejemplo.”

“Se considera generalmente la pigmentación como un proceso de defensa de la piel contra la acción de la luz.”

“Son las radiaciones más refrangibles las que provocan la actinodermatitis. Este hecho ha sido bien establecido por Bouchard, haciendo caer sobre su brazo el espectro de la luz solar. Bajo el rojo no sobrevino ninguna reacción; bajo el amarillo se pro-

dujo una simple sensación de comezón; bajo el verde apareció un eritema y, bajo el violeta, se produjo una verdadera flictena'' (*strohl*).

2—Acción sobre la célula: tiene una acción abiótica que se manifiesta por su poder bactericida, más marcado para las radiaciones de menor longitud de onda; por otra parte, estimula la carioquinesis, efecto que es igualmente más marcado hacia el lado del violeta.

Callando sus efectos generales, nos limitaremos a decir que la ciencia de las aplicaciones médicas de la luz se denomina *fitoterapia*.

Todo el mundo sabe que con unos dos voltios se puede hacer funcionar una bombilla de linterna, obteniendo luz más o menos blanca; si la pila *se afloja* y su voltaje disminuye, decrece la intensidad de la luz producida, pero, además, no se produce ya luz blanca sino amarillenta o rojiza: se ve que *para obtener una determinada longitud de onda se necesita disponer de un determinado voltaje*; en el cuadro adjunto (construido con datos del esquema de Holweck, se ve en la columna de los voltajes que para producir radiaciones luminosas se necesita disponer de algo más de 1.23 voltios (voltaje crítico de excitación); si se va aumentando el voltaje, se van produciendo radiaciones de onda más corta sin que por eso dejen de originarse las que se producían con menores voltajes; con una diferencia de potencial suficiente puede producirse una luz sensiblemente blanca. Estos hechos son la traducción burda de un fenómeno de la más alta importancia en el campo de la física:

Si se tiene una piedra junto a un lago, pueden producirse ondas en éste arrojando la piedra; pero para hacer eso debe cumplirse la condición indispensable de disponer de una fuerza capaz de levantar la piedra: cualquier fuerza inferior a ésta, aplicada por el tiempo que se quiera, no producirá onda alguna, pero basta que se alcance o sobrepase ligeramente la fuerza requerida, para que puedan producirse ondulaciones. De la misma manera, para excitar la producción de luz por un átomo, se necesita desplazar uno de sus electrones (análogo a la piedra) y esto requiere un cierto esfuerzo, una determinada diferencia de potencial, sobrepasada la cual aparece la onda; el cambio de posición del electrón requiere un esfuerzo diferente cuando varían el átomo productor y la radiación que se produce; por eso, para cada radiación hay un cierto potencial de excitación; estos hechos son una traducción lejana del fenómeno de cuantificación de la energía.

Si se calienta un pedazo de hierro, puede observarse lo siguiente: a 300° —400°C. el cuerpo irradia calor (calor radiante de los antiguos físicos) sin que se haya producido cambio alguno en su aspecto. A 800° se producen —a más calor— radiaciones luminosas: hay la producción de luz de color *rojo cereza* (límite inferior del rojo); aumentando la temperatura aparecerán sucesivamente radiaciones anaranjadas, amarillas y finalmente blancas (producción de todas las radiaciones, *rojo-blanco* de los industriales); ante estos hechos era de preguntarse si no hay un parentesco entre la radiación de calor y la luminosa.

Descomponiendo la radiación solar por medio de un prisma de sal gema, halló Hershell en 1801 que por debajo del rojo (es decir, en la zona de radiaciones de mayor longitud de onda que él) hay rayos que no producen la sensación de luz y sí la de calor; esta nueva radiación recibió el calificativo de *infrarroja*, debido a su posición en el espectro; está constituída por radiaciones análogas a las luminosas, pero de mayor longitud de onda que las de color rojo.

El infrarrojo se extiende aproximadamente desde las longitudes de onda de 343 *mu* hasta las de 8.000 A° y se le ha dividido en dos porciones:

Infrarrojo próximo, de 7700 A° a 8000 A°

Infrarrojo lejano, de 343 *mu* a 7700 A°

Los rayos infrarrojos producen los siguientes efectos:

a) Físicos: La descarga de los electroscopios y la excitación de fluorescencia son prácticamente nulas; en cambio, estos rayos se degradan cuando son absorbidos por la materia, y en virtud de esa degradación, *calientan* el medio que los ha absorbido.

b) Químicos: Su acción sobre la placa fotográfica es sensiblemente nula; *sensibilizando* previamente la placa mediante compuestos adecuados, se llega a hacerla sensible a los infrarrojos.

c) Biológicos: Fundamentalmente producen calefacción de la piel sobre la cual inciden, fenómeno que es más marcado para el infrarrojo próximo; esa calefacción, que es percibida por el individuo, se acompaña de sudor local. “Los rayos infrarrojos tienen una acción particularmente marcada sobre la circulación periférica. *Algunos segundos después de iniciada la irradiación se ve aparecer sobre la piel una coloración roja que tiende al amarillo-marrón y al mismo tiempo un ligerísimo estado de tur-*

gescencia. Ese estado se acentúa a lo largo de toda la duración de la irradiación; luego decrece lentamente a partir del momento en que la irradiación cesa. El estudio micro-angioscópico muestra que, bajo la influencia de la radiación infrarroja, se produce a nivel de los vasos de los plejos venosos y arteriales subpapilares, un estado de vasodilatación que aumenta por grados sucesivos con la intensidad de la irradiación y la duración de ella, y termina por alcanzar un platillo correspondiente a la dilatación máxima de las arteriolas y a la utilización de la totalidad de los capilares locales. La magnitud de estos fenómenos está en relación con la cantidad de energía absorbida y con la susceptibilidad vascular”.

Nótese que el fenómeno es inmediato y no hay latencia.

“Esta circulación periférica intensa activa la nutrición de las células cutáneas por aporte de nuevos materiales a las células de la epidermis mucosa y paso a la circulación de los productos de secreción elaborados por ellas. Acelera por otra parte la resorción de las células epidérmicas destruidas y favorece su regeneración. Los rayos infrarrojos modifican, pues, la marcha del eritema producido por otras radiaciones, sin oponerse por eso, ni contrariar su acción.” (E. y H. Biancani-Delherm).

Las exposiciones largas y repetidas a las radiaciones infrarrojas, producen una pigmentación moteada poco intensa, a nivel de la piel. Las radiaciones del infrarrojo próximo pueden alcanzar a penetrar hasta profundidades del orden de 1.5-3 cm de la superficie de la piel, pero 3 mm de ella se ha absorbido ya un 99%. El infrarrojo lejano es menos penetrante aún, más absorbido por la epidermis y —por consiguiente— de mayor efecto terapéutico.

En cuanto a la acción sobre la célula, las dosis moderadas de radiación estimulan el metabolismo y crecimiento celulares; las irradiaciones exageradas determinan la mortificación celular.

La aplicación médica de los infrarrojos constituye la infrarrojoterapia.

### III — EL ULTRAVIOLETA

Pero si hay ondas por debajo del rojo, ¿existe por ventura alguna cosa que demuestre que no las hay también más allá del violeta? Wollaston respondió afirmativamente a esta pregunta cuando, en 1802, halló una radiación fuertemente activa sobre la placa fotográfica y colocada más allá del violeta, hecho este último que le hizo llamarla *ultravioleta*. Lo mismo que los infrarrojos, los ultravioleta no producen sensación luminosa en la retina.

El ultravioleta se extiende entre 136 y 3990 A° y comprende:

el ultravioleta próximo, de 2900—3900 A°

el ultravioleta lejano, de 136—2900 A°

La producción de radiaciones ultravioleta requiere voltajes del orden de 12 a 50 voltios (para la porción media de la banda).

Los efectos principales de los ultravioleta son los siguientes:

a) Físicos: Excitan la fluorescencia de una buena cantidad de sustancias, descargan los electroscopios (marcada acción ionizante).

b) Químicos: Las acciones químicas de los ultravioleta son numerosas y enérgicas, hasta el punto de que se les ha denominado *radiaciones químicas*. Impresionan fuertemente la placa fotográfica.

c) Biológicos.

1—Sobre la piel: El efecto más notorio del ultravioleta cercano (longitud de onda del orden de 3150 A°) es la producción de un eritema en la piel sobre la cual inciden; a propósito de este eritema puede realizarse una serie de observaciones del mayor interés: en primer lugar, no es inmediato, sino que está precedido por una *fase de latencia*; en segundo lugar, para producir el eritema liminal, es decir un simple esbozo de reacción eritematosa, se necesita administrar una cierta cantidad de radiaciones ultravioleta, cantidad que ha sido bautizada con el nombre de *dosis eritema*, de inmensa trascendencia terapéutica pero que como número no tiene más valor que el de una media biológica y como reacción es un fenómeno netamente individual, ya que la sensibilidad a los ultravioleta cambia de una piel a otra. Al eritema sucede —después de unos días— una pigmentación local oscura y luégo descamación. Administrando una dosis mayor que la dosis eritema, se llega a producir una quemadura, con vesiculación, que cura en el plazo de unos 25 días; esta quemadura tiene el carácter de ser una quemadura producida en frío y no acompañada por sensaciones distintas de las de comezón y dolor locales.

El mismo ultravioleta cercano produce un efecto muy importante: transforma el ergosterol cutáneo en vitamina D, ejerciendo una acción antirraquítica. No deja de ser llamativo el hecho —bastante comentado por cierto— de que la porción del ultravioleta que se ha mostrado cancerígena para los animales (banda de radiaciones entre 2900 y 3200 A°) sea la misma que obra sobre el colesterol: este hecho vuelve a plantear el eterno

asunto de las relaciones entre estéridos y cáncer; sin embargo, no hay todavía pruebas concluyentes del papel de los ultravioletas en la cancerización espontánea de la piel humana.

El ultravioleta lejano se opone al próximo por el hecho de que destruye la vitamina D. La acción de toda la banda ultravioleta es netamente superficial, porque estas radiaciones apenas alcanzan a profundizar 1 mm. en el tejido celular subcutáneo.

2—Acción sobre la célula: es una acción abiótica, que se manifiesta por su carácter bactericida y por su acción sobre la piel; en esta última, producen la muerte de las células de la capa mucosa de Malpighi, a la cual se debe la descamación fina que presenta la piel irradiada; la razón de que el trastorno no se objetive sino después de un cierto tiempo (latencia), radica en el hecho de que se necesita que las capas basales de la epidermis proliferen lo suficiente para que la capa de células muertas salga a la superficie, siendo reemplazada por otras nuevas, producidas en la profundidad. Estas acciones son más marcadas para el ultravioleta lejano.

Los ultravioleta, como los infrarrojos, no dan sensación de luz cuando inciden sobre el ojo; en cambio, producen conjuntivitis molestas y —si la intensidad de la radiación es grande— llegan a provocar retinitis que da una amaurosis temporaria o definitiva: por esta razón no debe permitirse a nadie el trabajo de arco eléctrico (que emite muchos ultravioleta) sin una adecuada protección por medio de anteojos negros.

Como se ve, las acciones del ultravioleta son semejantes a las de las zonas más activas del espectro luminoso; esta razón hizo englobar bajo el nombre de actínicas a tales radiaciones, pero hoy se ha reducido el significado del vocablo a la categoría de sinónimo de ultravioleta: así, salvo indicación expresa en contra, actinoterapia indica ultravioleta-terapia; un detalle que nunca deberá olvidarse es la protección de los ojos (mediante anteojos oscuros) en el curso de la irradiación ultravioleta.

La utilidad de los ultravioleta en la tuberculosis es cosa que no se discute desde un punto de vista general pero sí en cuanto a los detalles. El Consejo de Fisioterapia de la Am. M. Ass. resume así los puntos de vista actuales (1942).

“En la tuberculosis extrapulmonar activa sin tuberculosis pulmonar activa, la luz solar es el tratamiento de elección en los huesos y articulaciones, ganglios linfáticos y aparato urogenital, sobre todo en los sitios elevados.

El beneficio es indudable en la tuberculosis de los huesos, articulaciones, intestinos, ganglios linfáticos y laringe. En la piel sólo el lupus vulgar responde satisfactoriamente a los rayos ultravioleta. La escrofuloderma (*escrofulide*) y el eritema inducido reaccionan favorablemente a veces. En los huesos y articulaciones conviéndose en general en que una exposición gradual, apropiada, a la luz natural es lo más eficaz, combinándola con otras medidas, en particular ortopédicas. La luz artificial constituye la segunda elección. (Oficina Sanitaria Panamericana).

*La luz solar.*—Las radiaciones más diversas, mezcladas en proporciones variables con la hora, el día, el lugar, las condiciones meteorológicas, la altura sobre el nivel del mar, etc., es lo que denominamos un tanto impropriamente luz solar; en realidad hay en ella radiaciones infrarrojas, luminosas de todos los colores y ultravioletas; de estos rayos, los ultravioleta son los más refrangibles y es por ello que cuando el sol principia a levantarse, cuando no hay todavía luz notoria, cantan los gallos: es que su ojo es sensible a estas radiaciones y por tal hecho su día comienza antes que el nuestro; inversamente: en la tarde, cuando el sol declina, las radiaciones ultravioleta (más refractadas) pasan sobre nosotros, mientras que las rojas —menos refrangibles— nos alcanzan y como los citados animales tienen ojos poco sensibles a la radiación roja, terminan el día cuando nosotros aún vemos; en dos palabras, su banda de percepción luminosa está desplazada hacia las ondas cortas, con relación a la nuestra. No está de más recordar que la vitamina A rige la facilidad de adaptación a la oscuridad —su trascendencia en la visión sería inmensa si se confirma el hecho, parcialmente demostrado, de que el púrpura retiniano es una proteína compleja, en que la vitamina A sería el grupo prostético—. El estudio de la aplicación de la luz solar como medio terapéutico se denomina Helioterapia. La sensibilidad de la piel a la luz solar parece condicionada por el complejo B2 y un buen ejemplo de ello lo constituye *pelagra*.

#### IV -- LOS RAYOS X

En 1875 Rontgen hace su famoso descubrimiento: los rayos X. Lo que llamó la atención, lo que resultó verdaderamente desconcertante respecto a ellos y constituyó la base de sus primeras aplicaciones, fue su extraordinario poder de penetración (comparado con las otras radiaciones conocidas hasta entonces). El nombre de X dado a estos rayos surgió de la ignorancia completa que

envolvía todo lo relativo a su naturaleza; sólo más tarde la difracción por los cristales —experimentada inicialmente por Friedrich y Knipping sobre la base de las ideas teóricas de Laue— permitió establecer su naturaleza ondulatoria e incluírlos en la gama de las radiaciones electro-magnéticas. Bragg llegó a demostrar que los rayos X emitidos por un tubo pueden descomponerse en un espectro análogo al de la luz, abriendo el camino a las experiencias de Moseley y Barkla, que tanta trascendencia tuvieron en la adquisición de las nociones modernas sobre la constitución del átomo. Si a esto se añade el papel desempeñado por los rayos Rontgen en medicina (tanto en diagnóstico como en terapia) y en la industria, seguramente no hallaremos otro agente que haya sido más decisivo para el progreso moderno (aparte de la electricidad).

No nos ocuparemos detalladamente de los rayos X porque en algún otro sitio se hablará de ellos más detenidamente; nos limitaremos a citar aquellos datos que permiten ubicarlos entre las radiaciones electromagnéticas y establecer comparaciones entre ellos y los demás rayos del espectro:

La banda de rayos X se extiende entre 12 y 0.06  $\text{A}^\circ$ ; no hay límite claro entre ellos y los gamma, con los que se superponen parcialmente.

Los rayos Rontgen se producen por el choque de un haz de electrones (rayos catódicos) sobre un bloque de metal denominado anticátodo; cuanto mayor sea la velocidad con que se precipitan esos electrones sobre el anticátodo, mayor será la frecuencia y menor la longitud de onda de las radiaciones emitidas; y como a mayor diferencia de potencial entre cátodo y ánodo-anticátodo corresponde una mayor velocidad de los electrones que integran el haz catódico, el aumento del voltaje que se aplica al tubo se traducirá por la producción de radiaciones de onda más corta; aparte de las ventajas cualitativas que esta disminución de la longitud de onda acarrea en la terapia, el uso de radiaciones de onda muy corta es la única manera de hacer tratamientos profundos en forma práctica y eficiente porque a medida que decrece la longitud de onda aumenta la penetración de los rayos Rontgen. Atendiendo a estos factores, suele dividirse a las radiaciones X en tres grupos:

a) Rayos blandos, de 10 a 1  $\text{A}^\circ$ , fácilmente detenidos por pequeños espesores de materia y por lo tanto poco penetrantes; se producen con voltajes que oscilan (grosso modo) entre 1.2 y

12.36 KV/. Este tipo de radiaciones es muy poco utilizado en el momento actual.

b) Rayos medios, de 1 a 0.1 A°; se emplean en radiografía y se producen con voltajes del orden de los 12.36 a 123.6 KV, respectivamente. Estas radiaciones, más penetrantes que las anteriores, se emplean en el radiodiagnóstico.

c) Rayos duros o penetrantes, de longitud de onda comprendida entre 0.1 y 0.06 A°, producidos con tensiones que de una manera general oscilan entre 100 y 210 KV. Estos rayos eran los empleados en la terapia hasta hace pocos años; hoy día se les sigue empleando para los tratamientos corrientes, pero se tiende a elevar los voltajes cada vez más y con los equipos modernos de 600 y más kilovoltios se producen radiaciones idénticas a los rayos gamma de dureza media.

Es interesante observar que los rayos X no se reflejan simplemente sobre la materia como lo hacen las radiaciones luminosas, sino que se difractan en las redes cristalinas cuando la incidencia se hace con ángulo conveniente.

Los efectos principales de los rayos Rontgen son los siguientes:

a) Físicos: Producen intensos fenómenos de fluorescencia en muchos cuerpos, lo que constituye la base de la fluoroscopia o radioscopia. Ionizan fuertemente el aire que atraviesan y por este mecanismo descargan los electroscopios.

b) Químicos: El efecto químico más importante desde nuestro punto de vista es su fuerte acción sobre la placa fotográfica, base de la radiografía.

c) Biológicos: Sobre la piel: cuando la dosis de rayos es suficiente, se producen de manera sucesiva las siguientes manifestaciones: eritema, pigmentación, descamación, epidermitis, necrosis.

Sobre la célula tienen una acción compleja: parecen favorecer la asimilación de oxígeno, detienen el crecimiento carioquímico si la dosis es suficiente y sobre todo si alcanzan a la célula en la fase biasteriana; en fin, si la dosis es suficiente se produce la muerte de la célula. Es interesante por su trascendencia teórica y práctica el dato relativo a la latencia: si con dosis suficientemente grandes se obtienen manifestaciones celulares más o menos precoces, las pequeñas dosis repetidas suelen tener acciones nada despreciables porque los rayos son capaces de producir una distrofia latente de manifestación tardía.

## LOS RAYOS GAMMA

Se llama así a aquella fracción de las radiaciones producidas por el rádium que no se desvía por la acción de campos magnéticos ni eléctricos, que fueron descubiertos por Villard en 1901.

Inicialmente se denominó gamma a las radiaciones electromagnéticas producidas por los cuerpos radioactivos pero se halló que esa agrupación, en cierta forma genética, no resultaba muy diciente porque la denominación adoptada cobija radiaciones cuya longitud de onda va desde los  $2.3 \text{ \AA}^\circ$  (rayos gamma del polonio) hasta  $0.001 \text{ \AA}^\circ$  (rayos gamma del torio-C), radiaciones que pueden producirse con voltajes de 10 a 12 500 KV.

Cada elemento radioactivo generador de rayos gama produce una radiación de longitud de onda definida; como en los tubos cargados con sustancias radioactivas no hay un sólo elemento sino una mezcla de ellos, la radiación producida no es homogénea y precisa realizar una filtración para detener los más blandos. Cuando se habla de rayos gamma en curieterapia, se entiende rayos gamma duros, es decir, los filtrados por 0.5-1mm. de platino.

Es de gran trascendencia en el campo de la atomística nuclear el hecho de que ni siquiera las radiaciones gama emitidas por un determinado radioelemento sean totalmente homogéneas, es decir, que son policromas; el estudio de los rayos gamma, realizado por Mauricio de Broglie sobre los espectros de fotoelectrones, permite darse cuenta de la existencia de niveles energéticos dentro del núcleo atómico, análogos en cierta forma a los niveles electrónicos traducidos por los espectros de rayos X.

Las propiedades de los rayos gamma son las mismas de los X, aun cuando más marcadas; sus principales efectos son:

Físicos: Fuerte ionización del aire con emisión de fotoelectrones muy veloces y de gran recorrido, cosa que dificulta las mediciones ionométricas. Efectos notorios de fluorescencia. (Ver *Dosimetría en rayos X*).

Químicos: Destacamos también la acción sobre la placa fotográfica: si esta acción permite hacer radiografía con los X, permite la realización de radiumgrafías cuando se aplican los gamma.

Biológicos: Son los mismos que anotamos respecto a los X, observándose tan sólo una acción más electiva y una penetración mayor.

Quien haya seguido atentamente lo dicho hasta este instante, habrá notado la existencia de un vacío ante los rayos X y los ultravioleta, vacío que comprende radiaciones que van desde unos 140 hasta 12 A° y que pueden producirse con voltajes que oscilan entre los 123 y los 1200 voltios aproximadamente; son radiaciones intermedias porque participan de las propiedades de los ultravioleta (ultravioleta lejano) y de los X, verdaderas *radiaciones indecisas* si se nos permite la expresión; los más blandos de ellos fueron descubiertos por Millikan, pero la mayoría del estudio de estos rayos corresponde a Holweck.

En cuanto a sus efectos principales, son los siguientes:

Físicos: Ionización notoria del aire o en general del gas atravesado. Fenómenos de fluorescencia.

Químicos: Impresionan la placa fotográfica.

Biológicos: Tienen una acción bactericida.

En cuanto a su acción sobre la piel, nos limitaremos a citar la de los llamados rayos límites o de Bucky, que no son otra cosa sino los más duros de los intermediarios, o mejor un intermedio entre éstos y los X (se llama también rayos X ultrablandos —mejor sería decir infrablandos— a los intermediarios más penetrantes, pero esta denominación abarca una zona más amplia que la de los Bucky): Producen un eritema que aparece de las 6 a las 24 horas de la irradiación, aumenta irregularmente de intensidad en el plazo de un mes y decrece luégo hasta anularse en mes y medio aproximadamente; paralelamente al eritema evoluciona la pigmentación; los rayos límites de Bucky tienen ante todo un interés histórico, porque se les empleó ampliamente para tratamientos dermatológicos; hoy se ha prescindido de ellos casi por completo.

No está de más hacer notar que puesto que los rayos intermediarios —que son en cierta forma rayos X— se originan ya con 123 voltios, las bombillas eléctricas de Bogotá, que funcionan bajo una tensión de 150 voltios, los producirán constantemente y no es de esperar que sus efectos sobre la salud sean a la larga benéficos, máxime si se tiene en cuenta la constancia de esta irradiación que —como los ultravioleta y X— tiene una acción abiótica e irritante: es por esta razón por lo que la mayoría de las redes urbanas emplea tensiones de 110 voltios como máximum.

En 1886 descubre Hertz un nuevo tipo de ondas que, aparte de su trascendencia comercial y social incalculables, tenía el valor de ser la comprobación experimental de conclusiones teóricas abstractas, como eran las de Clerk Maxwell relativas a la naturaleza de la luz: el hallazgo de las ondas hertzianas, como se las ha llamado desde entonces, estableció de una vez por todas la existencia de radiaciones electromagnéticas y el parentesco de éstas con la luz.

Las ondas de Hertz eran radiaciones electromagnéticas cuya longitud de onda era del orden de 1 metro, verdaderamente desconocidas si se las compara con las anteriormente estudiadas; importa hacer notar que tales *ondas* se producían mediante descargas oscilantes, es decir, mediante las descargas que ocurrían en un circuito en el cual la corriente variaba de sentido periódicamente; son pues muy diferentes la corriente que recorre el circuito y la onda producida. La radiotelefonía, que nació de los trabajos de Branly y sobre todo de los de Marconi —continuadores de la obra de Hertz—, aprovechó las ondas; la medicina empleó las corrientes; de manera que la denominación de “tratamiento por las ondas cortas” entraña una inexactitud, disculpada por la universalidad del empleo de tal denominación.

Aplicadas a la radiotelefonía y a la radioemisión, las ondas hertzianas fueron afanosamente estudiadas tanto desde el punto de vista teórico como desde el práctico y fueron los aficionados quienes iniciaron y llevaron a cabo la aplicación de ondas cada vez más cortas, porque habían notado que a medida que aumentaba la frecuencia (disminución de la longitud de onda) crecía el alcance de las radiocomunicaciones. Hoy se reconoce la existencia de cuatro grandes sectores en la banda de ondas hertzianas: ondas largas, de más de 1.000 metros; ondas medias, de 100 a 1.000 metros; ondas cortas, de 1 a 100 metros, y ondas ultracortas, que se extienden desde el metro hasta el límite del infrarrojo.

Dijimos que la medicina aplica las corrientes de alta frecuencia y no las ondas correspondientes; es posible usar tales corrientes porque se sabe que su circulación no es impedida por la existencia de un condensador en el circuito: en las aplicaciones médicas, el individuo forma generalmente parte del dieléctrico de tal condensador. Inicialmente se emplearon frecuencias de 100 kilociclos (longitud de onda igual a 3 kilómetros), pero a me-

dida que mejoran las técnicas se va elevando la magnitud de las frecuencias utilizables, de manera que actualmente se usan a menudo ondas de 1 metro (frecuencia de 300.000 kilociclos); muchas son las modalidades de aplicación de estas corrientes y no vamos a detenernos explicándolas, pero puede decirse que en términos generales:

|  | Kilociclos |
|--|------------|
| la fulguración emplea frecuencias de 500 | a 1.000    |
| la diatermia " " " 500                   | a 1.000    |
| las ondas cortas médicas " " 20.000      |            |

En todos los casos de aplicación de corrientes de alta frecuencia, el fenómeno se reduce al paso de una corriente alterna muy frecuente a través del organismo; éste, como todo paso de corriente a través de un conductor, desarrolla calor (efecto Joule), pero sin acomodarse cuantitativamente a la conocida ley de Joule, debido al mecanismo especial por el cual es conducida la corriente.

Sin entrar en detalles, podemos decir lo siguiente en relación a la acción de las corrientes de alta frecuencia sobre el organismo:

1) Esencialmente, la acción de estas corrientes se reduce a producir una calefacción de los tejidos atravesados; es la reacción biológica de éstos ante la calefacción local lo que les confiere actividad terapéutica a dichas corrientes.

2) La calefacción disminuye a medida que la frecuencia crece.

3) La calefacción se hace con una cierta electividad, de acuerdo con la naturaleza del tejido y la longitud de onda empleada:

Con la diatermia, la grasa se calienta fuertemente, la piel poco y el músculo muy poco; con ondas de 3 metros la grasa se calienta medianamente, el músculo y la piel poco pero en proporción análoga.

4) Con la disminución de la longitud de onda los diferentes tejidos manifiestan una tendencia a calentarse igualmente (pérdida de la electividad).

5) Los efectos biológicos de las corrientes de alta frecuencia son los siguientes: aumento de la temperatura local y exageración del metabolismo celular local.

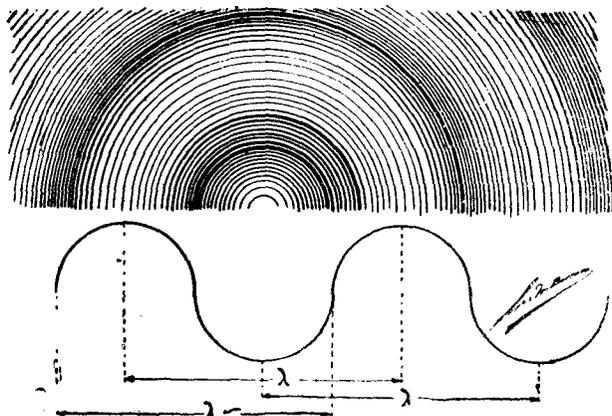
Vasodilatación en forma de hiperemia activa, profunda y durable.

Acción inhibidora neuromuscular antálgica.

Fiebre artificial en las aplicaciones generales (electropirexia).

Se comprende que la aplicación juiciosa de estas propiedades permita una variedad de acciones verdaderamente inmensa.

En fin, se recordará que cuando un conductor es recorrido por una corriente eléctrica, se calienta tanto más cuanto menor sea su diámetro; si se obliga a las corrientes de alta frecuencia que han entrado a través de un conductor relativamente amplio, a condensarse en un solo sitio, la temperatura se elevará especialmente en este último y podrán obtenerse efectos de coagulación local: tal es la base de la electrocoagulación.



LOS RAYOS COSMICOS

Esta enumeración y rápida revista de las radiaciones electromagnéticas quedaría incompleta si prescindieramos de citar una radiación cuyo conocimiento es relativamente moderno: la radiación cósmica. Y la incluimos aquí, no porque esté definitivamente probada su naturaleza ondulatoria o corpuscular, sino porque precisamente la existencia de esa duda hace posible que su ubicación dentro del cuadro de las fuerzas naturales sea ésta.

El descubrimiento de los rayos cósmicos deriva de las observaciones de Gockel, Hess y Kolhorster, quienes hallaron una ionización residual en recipientes aislados y puestos a cubierto de la acción de todas las radiaciones conocidas en los primeros decenios de este siglo; tal hallazgo debía sugerirles forzosamente por analogía la existencia de radiaciones semejantes en algo a los rayos X. Los estudios relativos a la procedencia, distribución, etc., de los rayos cósmicos están a la orden del día y han

avanzado gracias a los esfuerzos de Piccard y sobre todo de Millikan y Regener, verdaderos campeones de este estudio; son estas investigaciones las que han venido a dar, de paso, bastante luz respecto a la estratósfera. Lo más saliente en relación con estas radiaciones es su extraordinario poder de penetración (algunas fracciones llegan a penetrar espesores de 1 m. de plomo y más aún), lo que indicó una grande energía generadora de las mismas; para Millikan las radiaciones cósmicas resultan de la formación de elementos más pesados, a partir del hidrógeno, o de la *desmaterialización* de átomos de carbono o semejantes; es interesante hacer notar que ese mismo poder de penetración extraordinario, es decir, el hecho de que sean muy poco absorbidos por la materia que atraviesan, dificulta el ponerlos en evidencia y fue causa de que se descubrieran tardíamente; no nos ocuparemos del problema —aún no resuelto— de su naturaleza corpuscular u ondulatoria, contentándonos con decir que vienen de todos los puntos del espacio y que su producción requiere energías del orden de los diez mil millones de electrón-voltios, es decir, que si fueran radiaciones ondulatorias serían unas ultragamma muy lejanas; de todos modos, el descubrimiento de radiaciones mucho más cortas que las gamma (en el curso de la desintegración del litio por protones), correspondientes a voltajes del orden de los 17.000.000 de voltios, y la posible producción de otras más penetrantes que la teoría nuclear de Bohr postula para el bombardeo por neutrones muy rápidos, abren la posibilidad de que existan radiaciones mucho más cortas que las gamma y escalonadas entre ellas y los rayos cósmicos.

A su paso por la materia los rayos cósmicos producen acciones ionizantes intensas que se traducen por la aparición de los llamados *chaparrones* de corpúsculos *diversos*; y esto no puede dejar de tener una trascendencia acaso inmensa; a este respecto nos dice Jean Thibaud:

“Debemos hacer observar, finalmente, que estos mismos fantásticos desprendimientos de energía se producen lo mismo en los seres vivos que en la materia inerte. Por el choque de un corpúsculo cósmico primario, átomos de nuestro cuerpo estallan en chaparrones; estos fragmentos atraviesan nuestros tejidos y desencadenan las tempestades celulares locales que pueden resultar del desprendimiento de diez millares de millones de voltios. Sin pretender sistematizar demasiado, qué de consecuencias para nuestro metabolismo! Y puesto que hace milenios toda la cadena de los organismos celulares está bañada en esta radia-

ción, hay que pensar que ella participa a su vez, para bien o para mal, favorable o desfavorablemente, en nuestro equilibrio funcional"... "Se ha observado hace poco que el tratamiento por las radiaciones de onda corta, así como por los electrones rápidos, es capaz de provocar mutaciones definidas. No hay duda de que la acción de los rayos penetrantes, tales como los rayos X, sobre células en vías de división, pueda engendrar formas nuevas."

"Puede pensarse entonces que la acción de una radiación cósmica y de las radiaciones secundarias concomitantes sobre el núcleo de la célula viva, puede ser análoga. Si un gene recibe el choque de uno de estos corpúsculos cósmicos, sufrirá variaciones de estructura que acarrearán una mutación".

"Como la intensidad de la radiación cósmica, y de los charrones en especial, aumenta rápidamente con la altura, es interesante comparar la riqueza de especies, en el caso de la flora, entre las regiones montañosas elevadas y las llanuras de bajas latitudes. Según H. Thomas, las floras de las regiones altas serían particularmente ricas en variedades diferentes, de una misma especie, comprobación que vendría en apoyo de esta teoría."

Puesto que no hay una razón que obligue a admitir, que la acción de las radiaciones cósmicas se limite a producir exclusivamente mutaciones, y como ella va a trastornar precisamente el proceso reproductivo de la célula, no tendría nada de extraño que ella fuera la responsable de trastornos celulares graves, de origen hasta ahora inexplicado, y hasta de algunos cánceres.

#### RESUMEN

En el esquema adjunto condensamos lo relativo a las radiaciones, que ha sido expuesto en páginas anteriores, advirtiendo que este cuadro no pretende precisión matemática; los datos numéricos relativos a longitudes de onda y voltajes y la amplitud de las diversas bandas de radiación está calculada del esquema de Holweck, al que hemos añadido las subdivisiones del infrarrojo y ultravioleta, así como la sección que denominamos *ultragamma*, y que es desconocida en su mayor parte, y la de rayos cósmicos; en la representación de estas dos últimas bandas se ha prescindido de las proporciones relativas, respetadas en el resto. La segunda columna marca longitudes de onda, en metros

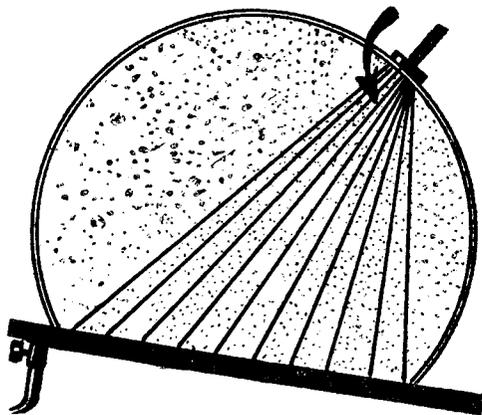
abajo, luégo en micras y finalmente en Armstrongs, a partir del infrarrojo próximo.

La tercera columna marca voltajes de producción: en voltios abajo, kilovoltios a partir de los X intermediarios; en la parte correspondiente a ultragamma y cósmicos se han indicado energías de producción en electrón-voltios.

En la cuarta columna se indica la magnitud del efecto ionizante, indicando simplemente que decrece con el aumento de longitud de onda, anulándose en la banda del infrarrojo.

La quinta columna representa el efecto sobre la placa fotográfica, en forma análoga al anterior; la dificultad de disponer de haces de radiación aprovechables da razón de las incógnitas que dejamos en el cuadro.

Respecto a las otras columnas cabe una observación análoga, aunque es casi seguro que los efectos de calefacción sean nulos. En cuanto a la producción de eritema sólo hemos querido indicar que en la práctica alcanza una importancia particular con los rayos X blandos.



#### REFERENCIAS

1.—*American Medical Association*—Council of Physical Therapy—*Valor terapéutico de la radiaciones U. V.* Extr. Publ. en el Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana. Vol. 22, N° 6, 1943.

2.—Best and Taylor. *Physiological Basis of Medical Practice.* 1943.

3.—Blum Harold. *Sunlight and cancer of the skin.* Journ of the Nat. Cancer Inst. December 1940.

- 4.—Coulter John S. *Physiotherapy in Modern Medical therapy in general practice*, de Barr.
- 5.—Delherm et Lacquerriere. *Traité d'electroradiotherapie*.
- 6.—Duncan. *Diseases of metabolism*. Saunders 1943.
- 7.—Esguerra Gómez Alfonso. *Radiaciones electromagnéticas*. Conferencia dictada en el Instituto Nacional de Rádium. Curso de Cancerología. 1945.
- 8.—Esguerra Gómez Gonzalo. *Radiodiagnóstico*. Tomo I.
- 9.—Gally-Rousseau. *Electricité et radiologie médicales*.
- 10.—Holweck. *De la lumiere aux rayons X*.
- 11.—Kahn Th. *Radioactivité et Trasmutation des atomes*.
- 12.—Millikan R. A. *Electrones (-| y —), protones, neutrones, fotones y rayos cósmicos*.
- 13.—Proust, Mallet, &. *Cours de Radiothérapie profonde et de Curic thérapie pénétrante*. Hopital Ténon.
- 14.—Strhol A. *Phisique Médicale*.
- 15.—Thibaud J. *Vie et Trasmutation des atomes*.
- 16.—Weill, Warren and O'Neill. *Radiologic Physics*.