

# XIII

## SOBRE MEDICIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS RAYOS RÖNTGEN

Por el doctor FEDERICO VIERHELLER  
Profesor suplente de Trabajos prácticos en física

## ZUSAMMENFASSUNG

**Ueber die Bestimmung der Energie der Röntgen Strahlen.** — In vorliegender Arbeit wurde die Beziehung zwischen der deutschen und französischen R-Einheit (Röntgen-Einheit) bestimmt, die zur leichteren Messung der Energie der X-Strahlen geschaffen wurden.

Da beide Einheiten auf verschiedenen physikalischen Erscheinungen beruhen, wurden die beiden Methoden einer kritischen Betrachtung unterzogen. Die grössere physikalische Genauigkeit kommt darnach der deutschen Einheit zu, die von Behnken aufgestellt wurde und direkt auf das C. G. S. System zurückgeführt ist. Der Wert der französischen R-Einheit ist variabel, weshalb die Beziehung zwischen beiden Einheiten zwischen 2,8 und 1,5 schwankt.

Die effektive Wellenlänge eines Strahlengemisches, das unter gewissen, näher beschriebenen Bedingungen erhalten wurde, von 0,1545 A. E., hat demnach eine Energie von 0,304 R-Einheiten nach Behnken.

## SOBRE MEDICIÓN DE LA ENERGÍA DE LOS RAYOS RÖNTGEN

---

La dificultad para hacer mediciones absolutas de la energía de los rayos Röntgen o de los rayos  $\gamma$ , fué la causa para la creación de una nueva unidad R (Röntgen) por Behnken en el año 1924. La definición de esta nueva unidad, dada por el mismo Behnken, es la siguiente :

« Es una cantidad de energía radiante, que produce una conductibilidad tal en la cámara de ionización, que la cantidad de electricidad, que pasa, medida en corriente de saturación, corresponde a una unidad electrostática, que debe ser relacionada a un centímetro cúbico de aire a 18 grados de temperatura (C) y 760 milímetros de presión. Para hacer esta medición, debe llenarse una condición indispensable, que es la de usar todos los electrones formados en el aire y evitar los efectos de las paredes de la cámara. »

Es decir, que la energía se mide por el poder ionizante de los mismos rayos, y se puede aceptar esta unidad R como *absoluta*, mientras que no existan métodos que permitan con más facilidad la determinación exacta de la energía por el método de absorción, es decir, por la medición del calor que producen los rayos durante el fenómeno de absorción. Holthusen demostró, ya en el año 1921, que el efecto de las paredes no era despreciable. Teniendo en cuenta este efecto y pensando que no existe, por el momento, ningún otro método para la medición de la energía y, además, que la unidad R está basada en las unidades del sistema C. G. S., podemos aceptar como correcta la unidad R de la definición de Behnken, para medir la energía de los rayos Röntgen y de los rayos  $\gamma$ .

Como se exige para la medición de la energía el efecto ionizante *total* de un electrón, hay que usar para la medición una cámara muy grande, de manera que los electrones, que reciben la energía total de un rayo (electrones primarios), encuentren un camino suficientemente largo, para dar toda su energía viva a los electrones secundarios y no penetrar por una de las paredes del instrumento de medición (electroscopio). El cami-

no, que puede recorrer un electrón con una energía, que corresponde a la velocidad de 200 000 voltios, es de 30 a 40 centímetros en el aire. Además, hay que observar el efecto ionizante de estos electrones, que salen de las paredes en los puntos de entrada y de salida del haz excitante. En cámaras pequeñas (de casi 2 cm. de largo) se pueden elegir los materiales de las paredes, de una manera tal, que los dos efectos están en equilibrio <sup>(1)</sup>. Nosotros hemos usado en el curso de nuestras investigaciones una pequeña cámara de carbón. Más adelante haremos la descripción de las investigaciones para la determinación de la relación de esta cámara y de una cámara, como la usada por Holthusen, de dimensiones grandes. En el curso de este trabajo no tomaremos nota de este efecto, que seguramente es muy pequeño, como lo han mostrado, también, Grebe y Martius.

Un año antes de la creación de la unidad R por Behnken, fué establecida en Francia otra unidad R por Solomón, que tiene la siguiente definición:

« Una R es una cantidad tal de rayos Röntgen, que produce una ionización equivalente a la de un gramo de radium metálico, en un segundo, y que se encuentra colocado a dos centímetros de distancia de la cámara de ionización (de eje a eje), filtrada a través de un medio milímetro de platino ».

Una contrastación de un instrumento con radium parece en general muy fácil en comparación al método de Behnken. La constancia de la radiación del radium es un elemento de seguridad para la contrastación, porque permite repetir las medidas en cualquier momento, con un preparado de cualquier poder. Pero bajo el punto de vista físico, los errores en la medición con radium pueden ser muy grandes. Por ejemplo, el cable, que conecta la pequeña cámara de ionización con el instrumento de medición, tiene que ser protegido con una capa muy espesa de plomo, para que no se produzcan efectos ionizantes en el cable mismo, el exterior del cual esta conectado con tierra.

El electroscopio debe ser protegido también contra los rayos difusos. Estos factores se pueden evitar en casos favorables; pero hasta hoy no se puede decir si los resultados, obtenidos con la ionización por los rayos  $\gamma$ , se pueden comparar directamente con el efecto ionizante de los rayos X. Es verdad que entre las varias longitudes de los rayos Röntgen hay una gran diferencia en el grado de penetración (la longitud de onda del rayo más blando, que pasa por el vidrio de un tubo es, más o menos, 1,0 U. Å., y la del más corto, que corresponde a una tensión de 220 000 voltios: 0,0561 U. Å.). Aceptemos que el término medio de la longitud

(1) Véase observación al fin del trabajo, página 196.

de onda emitida por el radium sea 0,030 U. Å. Tenemos una diferencia entre los dos valores límites de 0,97 U. Å. Sabemos que la absorción de cualquier longitud de onda es aproximadamente proporcional a la tercera potencia de la longitud efectiva, fuera de la región de la absorción característica. La relación entre los coeficientes de absorción de estos dos límites de longitudes de ondas es entonces :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{a \cdot 1,00^3}{a \cdot 0,03^3} = \frac{1}{27 \cdot 10^{-6}} = 37 \cdot 10^3.$$

Es decir, que la longitud más larga (1,0 U. Å.) es 37 000 veces más absorbida, que la más corta (0,03 U. Å.). Además, podemos atribuir a los rayos  $\gamma$  del radium otras cualidades, dado que los rayos ultrapenetrantes  $\gamma$  tienen su origen en cambios dentro del mismo núcleo del átomo y los rayos Röntgen en la vecindad del núcleo o más lejos de él.

También el efecto de los electrones de rebote es mayor en los rayos  $\gamma$  que en los rayos duros, que se pueden producir hasta hoy en un tubo a rayos Röntgen.

Otra fuente de errores en las mediciones con radium existe en la circunstancia de que los rayos  $\gamma$  tienen que ser filtrados con 0,5 milímetros de platino. Los tubos de platino, que generalmente en el mercado tienen la forma de un cilindro pequeño, no permiten una repartición igual del radium en todos los puntos de su volumen. El radium tiene que ser movido antes de la medición, para que quede bien repartido en el interior del tubo. Los tiempos de descarga del electroscopio varían según la repartición, y nosotros hemos medido en dos casos extremos, una variación de los valores de 80 por ciento. En uno de esos dos casos se encontró el preparado con su eje longitudinal paralelo al eje longitudinal de la cámara, y en el otro caso era el eje mayor del preparado perpendicular al mayor eje de la cámara de ionización. En el último caso era el tiempo de descarga más largo que en el primero, porque toda la sal se encontró en forma de una bola en el extremo del tubo de platino. La distancia de 2 centímetros fué tomada del eje de la cámara de ionización hasta el centro de esta bola de sal. Todos los puntos que están arriba de este centro se encuentran a una mayor distancia, y la ley del cuadrado de la distancia tiene ya un gran efecto en relación a la pequeña distancia total de 2 centímetros. Además, todos los rayos que salen de estos puntos más arriba, están disminuídos en su energía por la absorción en las partes de la sal, que se encuentran más cerca al eje de la cámara de ionización.

Por todas estas razones preferimos el método de Behnken, sobre todo

porque esta unidad R está basada en el sistema C. G. S. Pero como se usan las dos unidades en la práctica, hemos contrastado un instrumento Solomon en las dos unidades, para encontrar la relación entre las dos unidades R para una calidad dada de rayos.

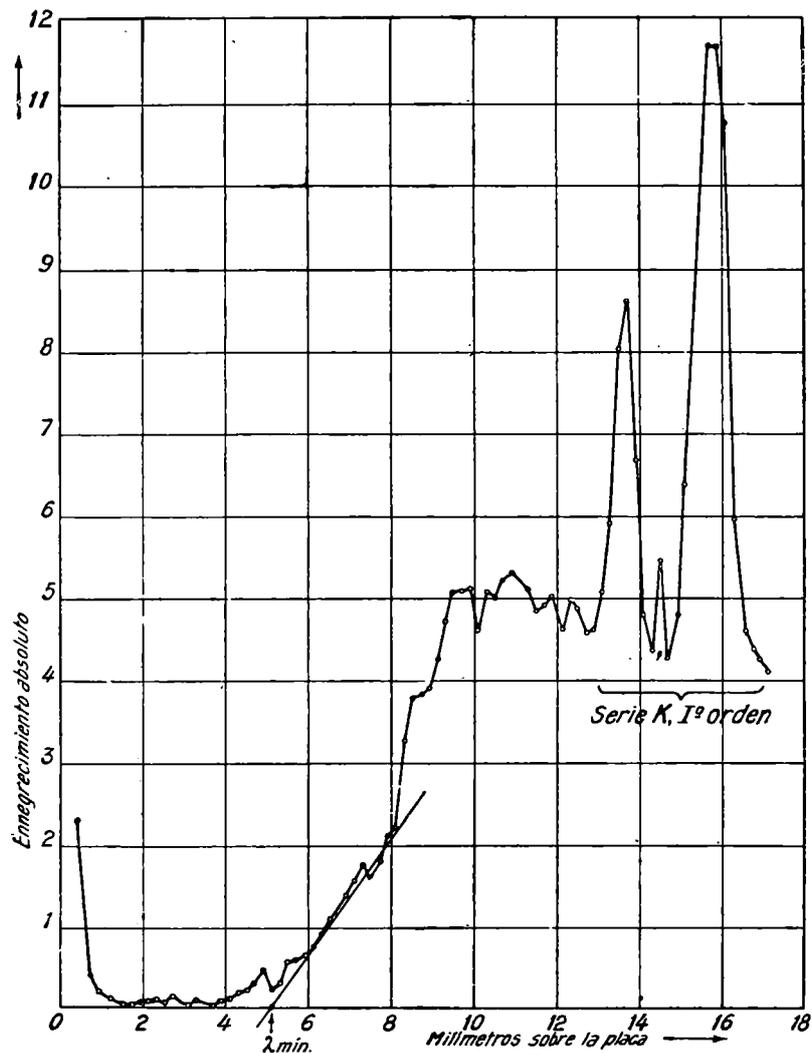


Figura 1

El autor ya había publicado en el año 1926 <sup>(1)</sup> los resultados de mediciones comparativas para la determinación de la relación entre estas unidades, pero, como se demostró más tarde, la cantidad del radium usado no correspondía a la cantidad supuesta, dado que una nueva contrasta-

<sup>(1)</sup> CARELLI y VIERHELLER, *Comparación entre las unidades Röntgen francesa y alemana*, en *Semana Médica* del 31 de diciembre de 1925.

ción, efectuada en el Instituto Curie de París, acusó una pequeña diferencia. Resolvimos efectuar, entonces, una nueva contrastación, facilitada por disponer para el presente trabajo de una instalación de experimentación más completa.

Las mediciones con el radium fueron hechas en el instituto del doctor Saralegui (Buenos Aires). La medición de la capacidad del instrumento Solomon, la contrastación de la escala de tensión del mismo instrumento, y la fotometría del espectro, para la determinación exacta de la tensión en el tubo, fueron hechos en el Instituto de física de la Universidad nacional de La Plata.

#### *a) Medición de la tensión máxima en el tubo*

El aparato generador era para 200 000 voltios y 20 miliamperios, un Neo-Intensiv de Veifa-Werke. El tubo usado era un tubo norteamericano para 10 miliamperios y 200 000 voltios de la compañía Víctor. El espectrógrafo, para la determinación de la longitud de onda más corta en el espectro, era de los laboratorios Seemann (Freiburg) y el fotómetro fué construido en los talleres de la Universidad según las indicaciones de Hartmann. La figura 1 muestra el fotograma. Las cuatro líneas en el espectro son las componentes conocidas de la serie K del tungsteno, y con éstas se puede medir fácilmente el limite del ennegrecimiento, que se produce por la tensión máxima en el tubo, por la ley de Planck-Einstein. Resulta, con una exactitud del 1 por ciento, que la tensión usada fué de 176,3 kilovoltios. Para producir una mezcla de rayos, los componentes de la cual no tenían mucha diferencia en sus longitudes de onda, se usó un filtro de cobre de 0,5 milímetros de espesor.

#### *b) Contrastación del instrumento con radium (unidades R. francesas)*

Hemos construído una pequeña caja de plomo, figura 2, en la tapa de la cual se encuentra sobre una lámina de celuloide el preparado de radium con su filtro de 0,5 milímetros de platino y a una distancia de 2 centímetros, medida de eje a eje. Las paredes de esta caja de plomo eran tan gruesas, que el cable, que conecta la cámara pequeña de ionización dentro de la caja, con el electroscopio de observación, estaba bien protegida contra los rayos difusos. El electroscopio mismo tenía una protección de más de 0,5 centímetros de plomo. El poder de los preparados y sus dimensiones se encuentran en la tabla I. Además contiene dicha tabla

los tiempos de descarga que se precisan para las cantidades de radium metálico usadas. Como la unidad R se refiere a 1000 miligramos de radium metálico, se han reducido a dicha cantidad los tiempos encontrados. Estos tiempos de 72 y de 130 segundos son, al mismo tiempo, según la definición de Solomón, la cantidad de R francesas, aplicadas,

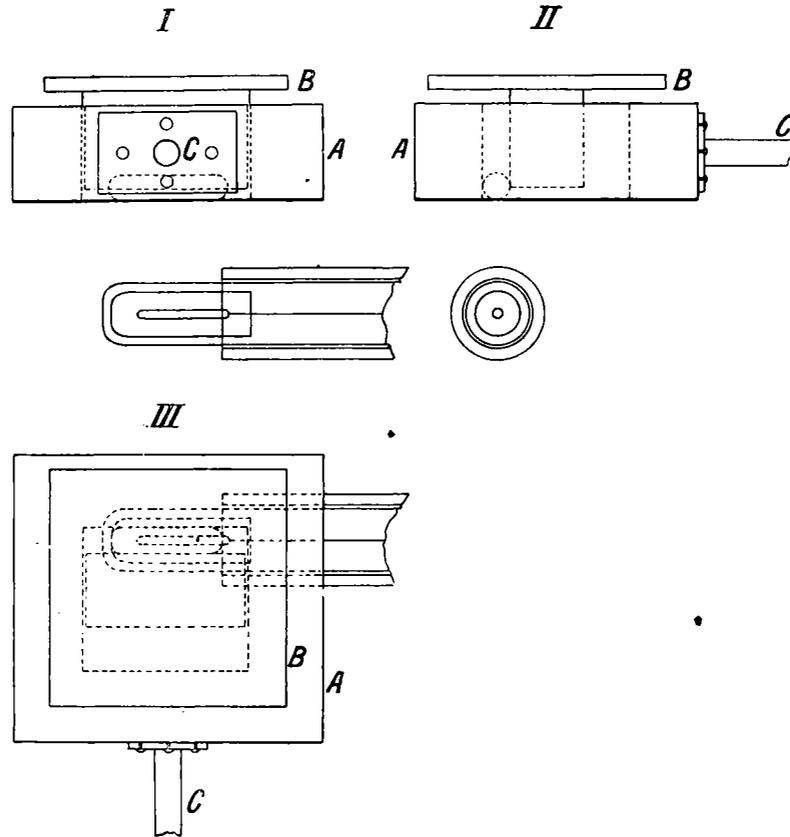


Fig. 2. — 1, 2, 3, varios cortes de la caja de plomo : A, caja de plomo  
B, tapa de plomo: C, mango de metal

durante la descarga del instrumento de 507 voltios hasta 82 voltios o de 60 hasta 10 divisiones (compárese la contrastación de la escala de tensión en el párrafo siguiente). En la tabla I damos, además, los valores respectivos y también los valores máximos y mínimos, que resultan por la diferente repartición del radium dentro del tubo de platino.

TABLA I

Número	RaBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O miligramos	Ra miligramos	Largo en milímetros	Ancho en milímetros	Tiempos de descarga			
					Para los miligramos usados		Para 1000 miligramos metálicos	
					A	B	A	B
1 . . . . .	96,58	41,704	25	4,3	1733,8	3121	72,3	130,3
2 . . . . .	48,10	20,77	20	2,2	3456,0	6221	71,8	129,0
							72,0	130,0

En las columnas A se encuentran los valores para la descarga, cuando el radium estaba bien repartido dentro del tubo de platino, y en las columnas B, cuando la repartición en el tubo no era buena.

c) *Contrastación del instrumento en unidades R alemanas*

Primeramente tenía que ser contrastada nuevamente la escala de la tensión. Éste fué hecho con una batería de acumuladores pequeños hasta

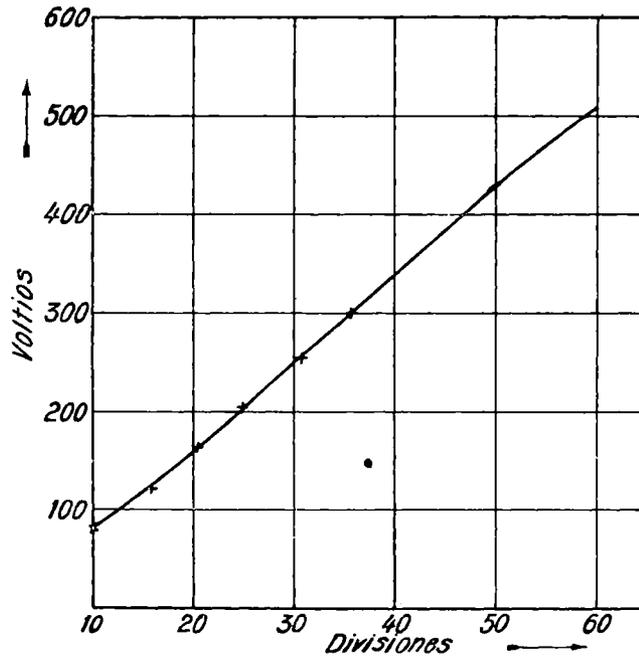


Figura 3

300 voltios, más o menos, y con un voltímetro de precisión de Weston. La figura 3 da la dependencia del voltaje de las divisiones de la escala. La parte de la curva desde 300 voltios hasta 600 voltios fué recombinada

con la antigua escala de contrastación. Los valores de la capacidad, establecidos por observaciones con esta parte superior de la curva de la tensión, corresponden tan bien con los valores encontrados con tensiones menores de 300 voltios, que se puede decir que la recombinación de esta curva es justa.

Hubo después que determinar la capacidad del instrumento, lo que se hizo con un condensador normal a placas, cuyo diámetro era de 15 centímetros y cuyo espesor era de 0,27 centímetros. La distancia de las placas era de 2,2 milímetros, de manera que con estos datos se podía calcular la capacidad normal según la fórmula :

$$C = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} \left( \log \text{nat} \frac{16\pi r (a+d)}{a^2} + 1 + \frac{d}{a} \log \text{nat} \frac{a+d}{d} \right) \quad (1)$$

La determinación de la capacidad del instrumento fué hecha de la manera siguiente : el electroscopio Solomón fué cargado hasta una cierta tensión estando el exterior del electroscopio conectado con tierra. Después fué conectada una de las dos placas del condensador normal, anteriormente conectada también con tierra, con el sistema aislado del electroscopio y observada la pérdida de tensión en el electroscopio mismo. La segunda placa del condensador normal, también muy bien aislada contra la primera placa, fué conectada con tierra, de manera que una pérdida de tensión por falta de aislamiento no era posible. La fórmula usada fué la siguiente :

$$C_x = \frac{C_n \cdot V_2}{V_1 - V_2} \quad (2)$$

donde  $C_x$  es la capacidad buscada,  $C_n$  la capacidad normal (69,5 cm),  $V_1$  la tensión primaria del electroscopio y  $V_2$  la tensión secundaria, después de la conexión de las dos capacidades. La tabla siguiente da los valores encontrados, con el valor término medio de 65,4 centímetros para la capacidad del Salomón.

TABLA II

$V_1$	$V_2$	C
250,0	121,4	65,6
339,0	163,6	64,8
421,0	205,0	66,0
507,0	247,0	65,1
		65,4

Con la fórmula siguiente se puede calcular, entonces, la cantidad de R alemanas, observando la descarga del instrumento Solomón, bajo las condiciones eléctricas ya mencionadas :

$$n = \frac{C (V_1 - V_2)}{300 \cdot t \cdot v} \quad (3)$$

En esta fórmula C es la capacidad determinada del Salomón,  $V_1$  y  $V_2$  son las tensiones antes y después de la observación,  $t$  el tiempo de descarga en segundos de la tensión  $V_1$  hasta la tensión  $V_2$  y  $v$  el volumen de aire de la cámara de ionización. Este tiempo  $t$  no lo precisamos para el cálculo de la cantidad de R alemanas, porque para la comparación de las dos unidades R, se observa la pérdida de la tensión  $V_{\text{máx}}$  hasta la tensión  $V_{\text{mín}}$ , es decir, en nuestro caso sobre toda la escala de tensión, de 507 voltios hasta 82 voltios. El volumen  $v$  de la cámara de ionización es de 2,00 centímetros cúbicos. La tensión usada es de 176,3 kilovoltios, el filtro usado de 0,5 milímetros de cobre, la corriente secundaria de 5 miliamperios, y la distancia foco-eje de la cámara, 50 centímetros. Bajo estas condiciones la longitud de onda efectiva producida por la mezcla es de 0,1545 U. Å. (Esta longitud efectiva se determinó según el método de Duane, por la absorción de la radiación en 1 mm de cobre.) Resulta, entonces, la cantidad  $n$  de R alemanas según la fórmula (3) :

$$n = \frac{65,4 (507 - 82)}{300 \cdot 2} = 46,3.$$

#### *d) Comparación de las dos unidades R*

Una descarga sobre toda la escala corresponde según lo dicho anteriormente a 130 ó 72 unidades R francesas, según la repartición del radium dentro del tubo de platino. Es decir, los 46,3 unidades alemanas corresponden a 130 o a 72 unidades francesas. La relación entre las dos unidades es, entonces, 2,8 ó 1,5. Anteriormente (1) encontró el autor como valor de la relación entre las dos unidades 2,66, lo que corresponde bien con el resultado de 2,8, teniendo en cuenta el mejor dispositivo de experimentación y también la circunstancia de que el patrón de radio estaba mejor definido, como ya se dijo. Para la práctica resulta, entonces, que cuando se trata de una comparación de las dos unidades, tiene que

(1) Memoria citada.

establecerse siempre, cómo la sal del radium o el radium metálico, estaban repartidos en el tubo de platino. La unidad R francesa no resulta, según estos experimentos, como unidad uniforme en sentido físico.

*c) La energía de los rayos usados*

Para expresar la energía de los rayos usados, o mejor, de la longitud efectiva de  $0,1545 \text{ U. \AA.}$ , tenemos que reducir nuestras observaciones a 1 segundo y a 1 centímetro cúbico de aire. Esta última condición ya fué cumplida por la división con el volumen de 2 centímetros cúbicos en la fórmula (3). El tiempo de descarga sobre toda la escala en las condiciones mencionadas más arriba, era de 152,5 segundos, de manera que *la energía de la longitud efectiva de  $0,1545 \text{ U. \AA.}$ , medida por el poder ionizante, es de  $0,304 \text{ R alemanas}$ , en las condiciones eléctricas y con la distancia indicada más arriba.*

FEDERICO VIERHELLER.

(Entregado a la secretaría de la Facultad el 5 de marzo de 1927; impreso en enero de 1928.)

NOTA. — Glocker y Kaupp han mostrado, recientemente, en la *Strahlentherapie* que una cámara pequeña de carbón, mezclado con un poco de silicio, mide como una cámara de aire; es decir, que mide la energía independientemente de la longitud de onda desde  $0,4$  a  $0,05 \text{ U. \AA.}$  Como todas las cámaras de carbón contienen silicio, hicimos la prueba correspondiente con nuestra cámara y hemos encontrado también independencia de la longitud de onda. *Medimos entonces, prácticamente, con una cámara cuyas paredes son de aire.*