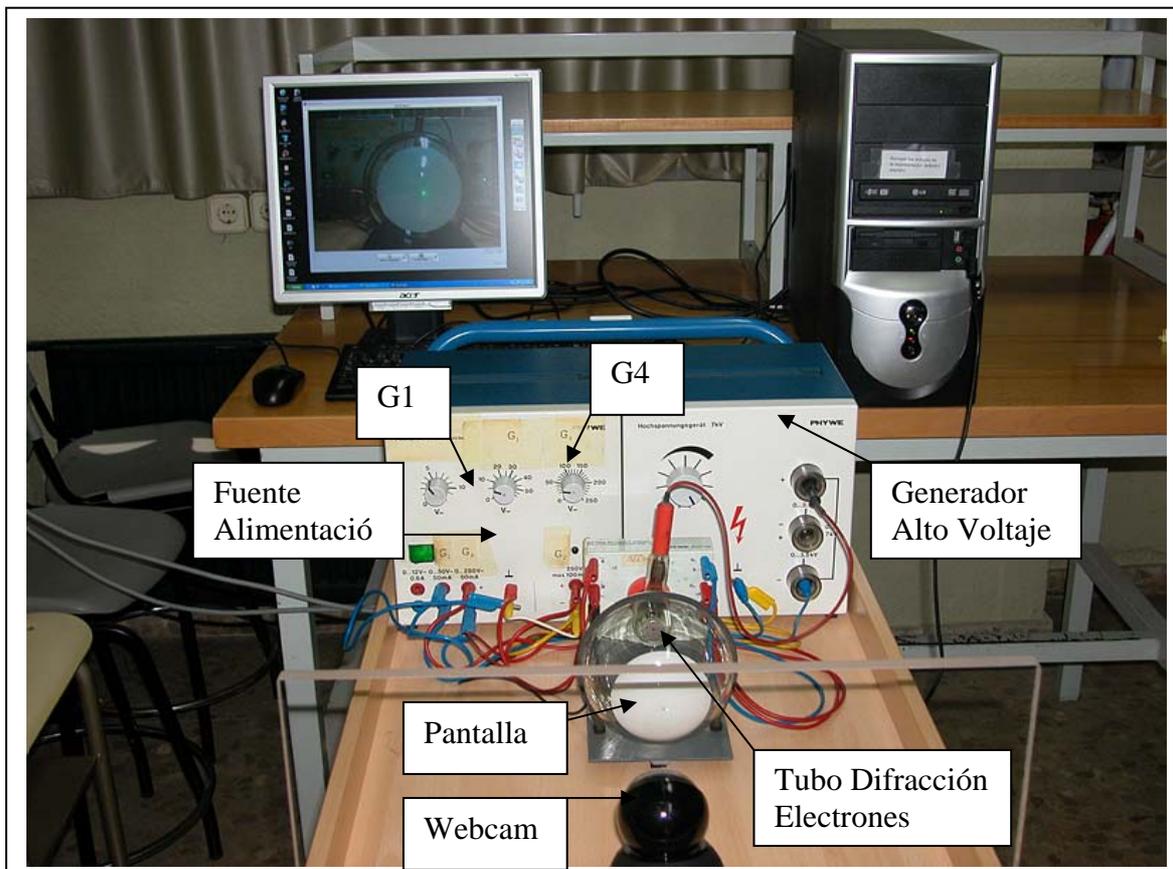


DEMO 26

Difracci3n de electrons



Autor/a de la ficha	Pedro Gonz3lez y Jordi Vidal
Palabras clave	Electrones, Relaci3n de 'de Broglie'. Naturaleza cu3ntica de la materia.
Objetivo	Visualizar los anillos de interferencia producidos por un haz de electrones al atravesar un blanco de grafito. Dependencia del tama1o de los anillos con el potencial acelerador.
Material	<ul style="list-style-type: none"> - Tubo de difracci3n de electrones. - Fuente de alimentaci3n para la extracci3n y focalizaci3n de los electrones. - Fuente de alimentaci3n aceleradora (de 0 a 10 kV). - Webcam para proyecci3n de im3genes. <p>IMPORTANTE: Esta demostraci3n est3 montada en un carro para su transporte a las aulas, ubicado en el laboratorio de F3sica Cu3ntica. Para recogerlo, contactar con el prof. Pedro Gonz3lez</p>
Tiempo de Montaje	nulo
Descripci3n	Se dispone de un tubo de rayos cat3dicos. Los electrones (rayos cat3dicos), extra3dos de un filamento incandescente por efecto termoi3nico, son sometidos a una diferencia de potencial aceleradora de algunos kV y focalizados sobre un blanco de grafito. Los electrones, dispersados por el grafito, viajan por el interior de una ampolla de vidrio en la que se ha practicado el vac3o (un vac3o suficiente para suprimir las posibles colisiones de los electrones con las mol3culas de aire) hasta alcanzar una pantalla superpuesta interiormente a un casquete esf3rico de la ampolla. Ya que la estructura del grafito corresponde a microcristales con todas las posibles orientaciones, las dispersiones de Bragg del haz electr3nico por el grafito dan lugar a anillos de interferencia constructiva sobre la



	<p>pantalla (cada electrón produce, al incidir sobre la pantalla, un punto luminoso).</p> <p>Las dispersiones de Bragg, así como la formación de anillos, a partir de las mismas, están explicadas detalladamente en el guión que acompaña a esta ficha. Es conveniente consultar este guión antes de proceder a la demostración práctica que se explica a continuación.</p> <p>Para observar los anillos elegir en la fuente aceleradora un voltaje de unos 5-6 kV, que corresponde a girar el botón regulador del voltaje hacia la derecha, desde el cero, un ángulo de 225°. Poner a 0 los botones controladores de la fuente focalizadora G1 y G4 para conseguir un haz fino.</p> <p>Una vez visualizados los anillos se puede observar cómo varía el tamaño de los anillos al hacerlo el voltaje acelerador. Para ello conviene fijarse en un anillo concreto. Al subir el voltaje el tamaño del anillo decrece. Ello está relacionado con el hecho de que, según la relación de de Broglie, la longitud de onda de los electrones disminuye al aumentar su momento (es decir, al aumentar el potencial acelerador aplicado a los mismos), por lo que el ángulo de Bragg disminuye.</p> <p>Comentar que midiendo los radios de los anillos y utilizando las distancias entre planos atómicos paralelos en el grafito se puede comprobar, para cada voltaje acelerador, la ley de Bragg. A la inversa, a partir de las medidas de los radios y de los voltajes aceleradores se pueden extraer las distancias entre planos atómicos paralelos en el grafito.</p> <p>Se puede comprobar que los impactos en la pantalla corresponden a partículas cargadas acercando un imán y observando la deformación de los anillos.</p>
<p>Comentarios y sugerencias</p>	<p>Aunque el experimento puede hacerse en penumbra y a la vista directa de los alumnos, resulta práctico una vez explicado el funcionamiento, tapar el tubo y proyectar, en la pantalla del aula, los anillos mediante una webcam. Aparte de evitar la aglomeración de estudiantes en torno al experimento, la condición de oscuridad hace que los anillos se vean nítidamente. Para ello se dispone de una tela negra que cae sobre una pared transparente de metacrilato a la misma altura que las fuentes pero en el extremo opuesto de la mesa experimental. Así se puede manipular las fuentes de alimentación lateralmente mientras las imágenes nítidas de los anillos aparecen proyectadas.</p> <p>IMPORTANTE: Esta demostración está montada en un carro para su transporte a las aulas, ubicado en el laboratorio de Física Cuántica. Para recogerlo, contactar con el prof. Pedro González</p>

DEMO 26

Difracci3n de electrones

GUÍA DETALLADA DE LA DEMOSTRACI3N

Introducci3n

La naturaleza cuántica de los sistemas físicos, descritos por ondas de probabilidad, implica una relaci3n entre su longitud de onda λ y su momento lineal p (medidos en un sistema de referencia dado). Esta relaci3n, propuesta por Louis De Broglie en 1914, antes de la formulaci3n de la teoría cuántica, se expresa en la forma:

$$\lambda = h/p \quad [\text{Ec. 1}]$$

siendo h la llamada constante de Planck: $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s.

Según esta expresi3n un electr3n (masa del electr3n: $mc^2 = 511$ keV) acelerado por una diferencia de potencial entre 1 y 10 kV, es decir con una energía cinética entre 1 y 10 keV, a la cual corresponde un momento p entre 32 y 101 keV/c, tiene una longitud de onda λ entre 0.39 Å y 0.12 Å. En el caso de fotones estos valores para λ est3n en el rango de los rayos X. Por tanto electrones con estas energías podr3n exhibir fenómenos de interferencia análogos a los que presentan los rayos X.

Uno de los fenómenos ondulatorios más característicos de los rayos X es su dispersi3n por cristales (sólidos cristalinos) con distancias interatómicas comparables a su longitud de onda. Se trata de la denominada *dispersi3n o difracci3n de Bragg* que analizaremos para su aplicaci3n a electrones.

Dispersi3n o difracci3n de Bragg

En 1912, W. Friedrich y P. Knipping, a partir de una sugerencia de M. Von Laue, hicieron que un haz colimado de rayos X pasase a trav3s de un cristal detr3s del cual se habíá colocado una placa fotogr3fica. Adem3s de un haz central (correspondiente a la direcci3n incidente) observaron en la placa una distribuci3n regular de puntos. Este patr3n fue explicado ese mismo ańo por William Lawrence Bragg por lo que al fenómeno se le dio el nombre de dispersi3n o difracci3n de Bragg.

Este experimento confirm3 dos hipótesis importantes: i) que los rayos X son una forma de radiaci3n electromagnética y ii) que los átomos de un cristal est3n distribuidos en una red regular.

La interferencia de dos rayos puede darse despu3s de ser dispersados por una serie de planos paralelos en los que se encuentran los átomos de un cristal. (hay diversas series de planos paralelos, ver Fig. 2). Dicha interferencia será constructiva (los rayos estarán en fase, intensidad máxima resultante, punto "brillante" en la pantalla) en las siguientes condiciones:

- Ambos rayos han de ser dispersados con el mismo ángulo con el que incidieron (α en la figura 1) independientemente de la longitud de onda, según la ley de reflexi3n de las ondas electromagnéticas.

- Entre los dos rayos dispersados por dos átomos en planos paralelos (incluyendo el caso del mismo plano) con ángulos iguales ha de haber una diferencia de caminos recorridos de un número entero de longitudes de onda, con lo cual, como muestra la figura 1, es fácil ver que:

$$2d \sin\theta = n \lambda \quad [\text{Ec. 2}]$$

siendo d la distancia interplanar para la serie de planos considerada, $\theta = \pi/2 - \alpha$ y n un número entero indicador del orden de la interferencia.

La Ec. 2 se conoce como condición de Bragg. Notar que para el orden dominante, $n = 1$ y λ dada, cada serie de planos paralelos, caracterizada por su distancia interplanar, sólo da lugar a interferencia constructiva (un punto en la pantalla) para un determinado ángulo θ .

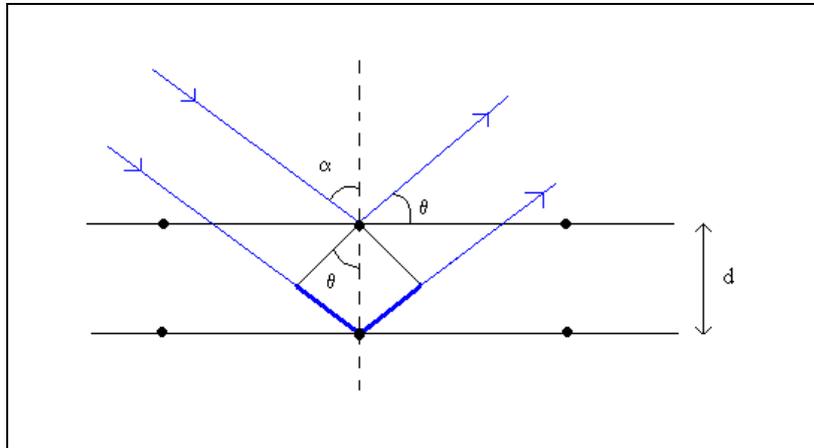


Fig. 1.- Esquema donde se muestra que para interferencia constructiva entre dos rayos, que son dispersados por átomos en dos planos atómicos paralelos, la diferencia de caminos – línea gruesa en color azul – es $2d\sin\theta$.

Difracción de electrones

Análogamente a los rayos X los electrones pueden experimentar dispersión de Bragg. Si en vez de un cristal se usa como dispersor un sólido como el grafito, formado por microcristales con todas las orientaciones posibles, en la pantalla se observarán anillos de interferencia constructiva en lugar de puntos. Ello se debe a un efecto acumulativo: la dispersión por una serie de planos paralelos en un microcristal producirá, para un orden dado, un punto de interferencia constructiva en la pantalla; el conjunto de microcristales orientado simétricamente alrededor del eje determinado por la dirección del haz inicial dará lugar a la formación de un anillo. Por tanto por cada serie de planos paralelos (caracterizada por su distancia interplanar) en un microcristal se tendrá un conjunto de anillos, un anillo por cada orden de la interferencia.

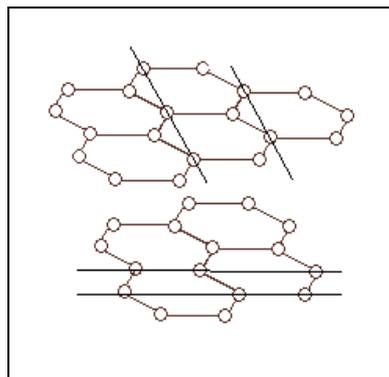


Fig. 2.- Dibujo esquemático de un conjunto de átomos en un microcristal de grafito. En la distribución superior se observa una serie de planos atómicos diferente a la de la distribución inferior. La distancia entre los dos planos de la distribución superior es la que llamamos d_1 , mientras que la de la inferior es d_2 .

Montaje experimental. Tubo de rayos catódicos.

Se dispone de un *Tubo de difracción de electrones* (o tubo de rayos catódicos) en el cual electrones producidos mediante efecto termoiónico, por calentamiento de un filamento, son acelerados por una diferencia de potencial V y dispersados por una lámina de grafito. Los electrones salientes viajan por el interior de una ampolla esférica de vidrio en la que se ha hecho el vacío (para evitar colisiones de los mismos con moléculas de aire) hasta alcanzar el extremo de

la ampolla en el qual hay una pel·lícula de un material fluorescente. Cada impacto electrònic en ésta produce un punto luminoso por lo que la pel·lícula juega el papel de pantalla en la que se proyectarà el patró de difracci3n.

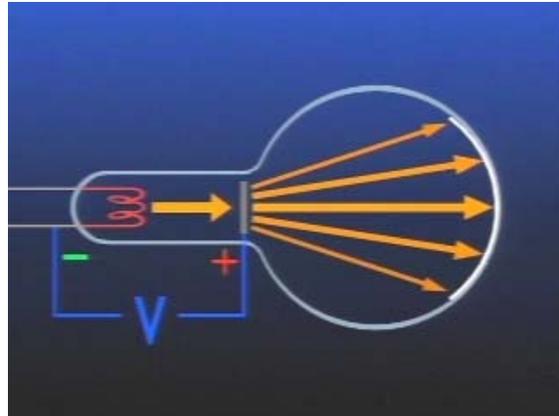


Fig. 3.- Dibujo esquemàtic del Tubo de difracci3n de electrones.

El Tubo de difracci3n se encuentra sujeto a un *soporte* a travs del cual se establecen las conexi3n elctricas a una *fuentes de alimentaci3n* y a un *generador de alto voltaje*. Para medir la tensi3n en el generador de alto voltaje mediante un *polímetro* estàndar se puede disponer de una punta de prueba tal que la lectura en el polímetro sea de un voltaje 2000 veces menor que el que proporciona el generador de alto voltaje. Los diàmetros de los anillos de difracci3n se pueden medir con un pie de rey.

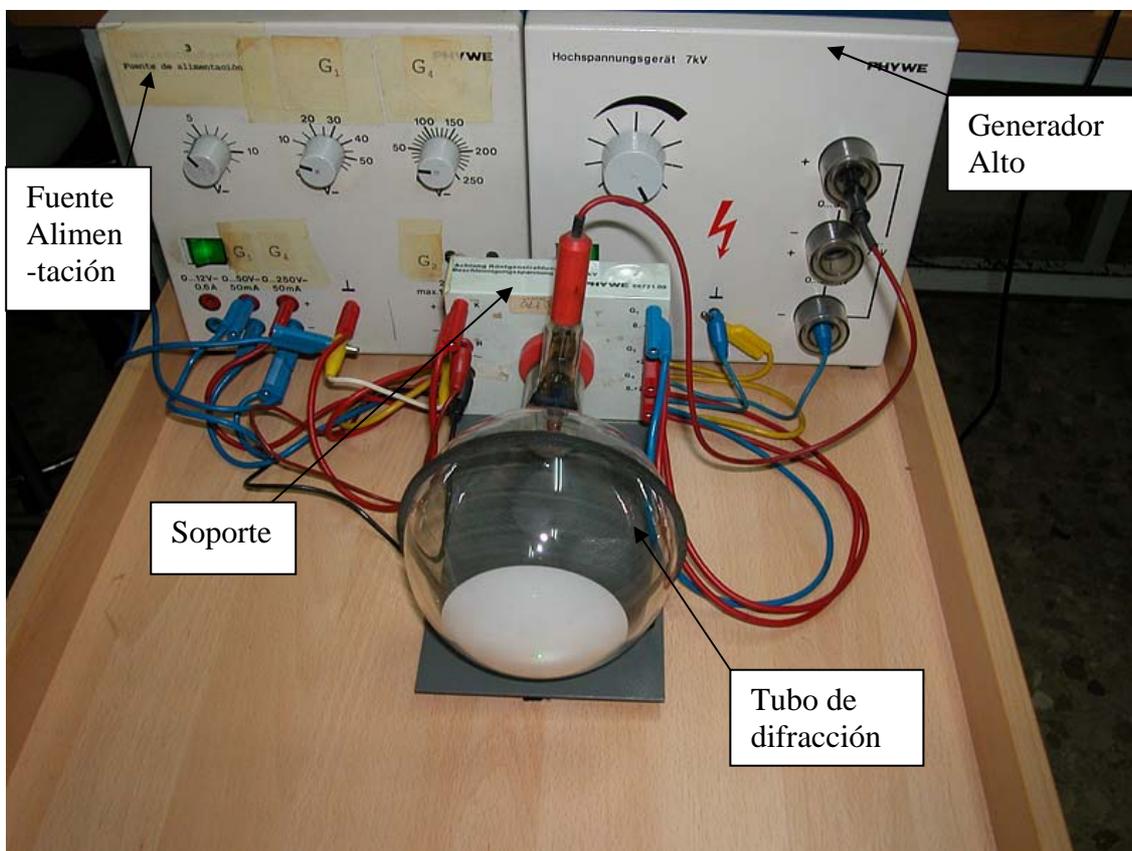


Fig. 4.- Foto del tubo de difracci3n y de su soporte en el que se conectan los cables al generador de alto voltaje y a la fuente de alimentaci3n.

Esquema experimental

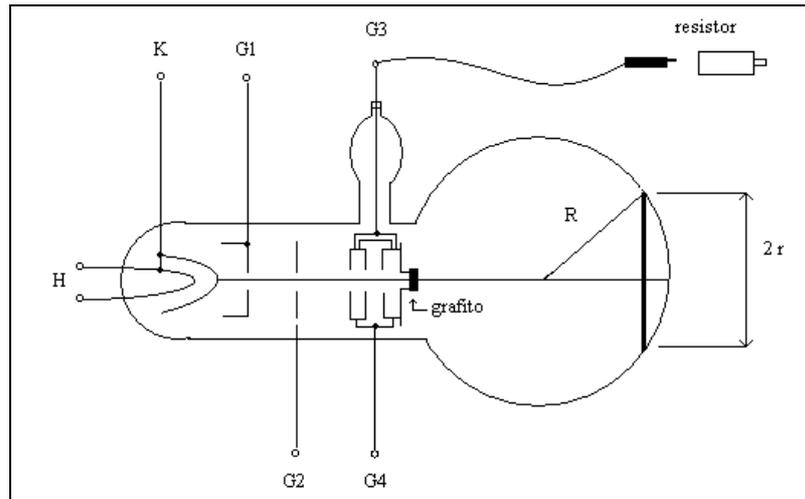


Fig. 5.- Esquema del montaje.

Los electrones salen de un cátodo incandescente por efecto termoiónico (calefacción del cátodo H) y con la ayuda de una tensión K, se dirigen a G1, un cilindro de Wehnelt que deja salir un delgado haz sometiéndolo a una ligera aceleración. Dicho haz es acelerado fuertemente por G3 y focalizado en la lámina de grafito mediante el sistema de lentes electrónicas focalizadoras G2 y G4. Un *resistor* de seguridad de 10 MΩ se coloca delante del ánodo G3. Los electrones se difractan en la lámina de grafito policristalino (formado por muchos y diminutos cristales orientados al azar) y penetran en la parte esférica de la ampolla de radio R. En la película de material fluorescente, situada en el otro extremo de la ampolla, los electrones forman los anillos de difracción.

Determinación de distancias interplanares

La energía cinética (no relativista) de los electrones acelerados por una diferencia de potencial U está dada por:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m} = eU \quad [\text{Ec. 3}]$$

donde e y mc^2 representan la carga y la masa del electrón respectivamente. A partir de la relación entre el momento y la longitud de onda, λ , dada por la Ec. 1, se puede equivalentemente escribir

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} \quad [\text{Ec. 4}]$$

con lo cual, usando la Ec. 2, se obtiene

$$\sin \theta = \frac{n}{2d} \frac{h}{\sqrt{2meU}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

siendo θ y U magnitudes medibles experimentalmente, a partir de las cuales se puede calcular el valor de d .

Realización de medidas

Puesto que no es fácil medir θ en las condiciones de la práctica, podemos utilizar la relación que existe entre el ángulo de dispersión θ y el radio de los anillos, r , que sí podemos medir con el pie de rey (mediremos el diámetro $2r$). A partir de la Fig. 6 se tiene la relación $\sin 4\theta = r/R$, siendo R (radio de la esfera del tubo de difracción) una constante conocida.

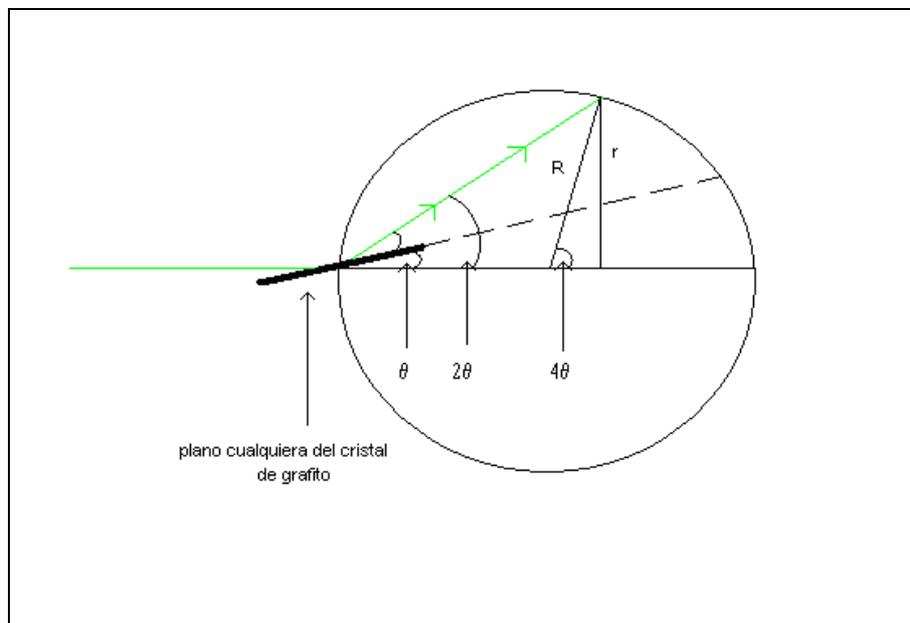


Fig. 6.- Dispersión de un haz de electrones por un plano cualquiera de un microcristal de grafito.

Utilizando las expresiones trigonométricas para el seno y coseno del ángulo mitad se obtiene fácilmente la relación

$$\sin \theta = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}}{2}}}{2}} \quad [\text{Ec. 6}]$$

En cuanto a la medida de $2r$ recordemos que hay, para cada orden, tantos anillos como distancias interplanares distintas haya. Los anillos, según su ángulo de dispersión, estarán mejor o peor definidos en la pantalla, tendrán más o menos “grosor”. El grosor puede deberse a una mala resolución al proyectarse en la pantalla pero a veces puede ser debido a que hay dos o más anillos, bien provenientes de distintas series de planos (al mismo orden o a órdenes diferentes) o bien de distintos órdenes de una serie de planos. En este caso podemos al menos medir el diámetro interior del anillo “grosso” puesto que esta medida correspondería, aproximadamente, a la medida del diámetro del más interior de los anillos que hay juntos.