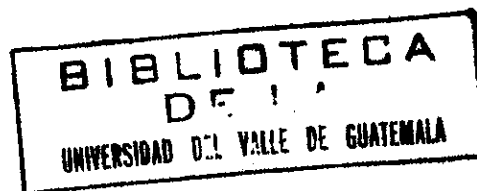


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades

EXPERIMENTO SOBRE  
APLICACION DE LA LEY DE BRAGG  
A LA REFLEXION DE MICROONDAS  
EN RETICULAS FORMADAS  
POR ESFERAS METALICAS

ANTONIO GARIGLIO



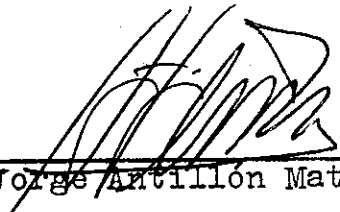
Trabajo experimental presentado para optar  
al grado académico de Licenciado en Física

Guatemala

1977

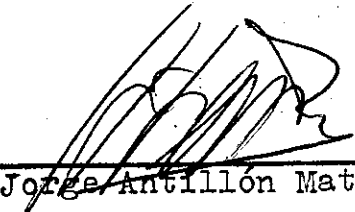
Vo. Bo. del Asesor:

(f)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Antillón Matta

Tribunal:

(f)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Antillón Matta

(f)

\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Suger Cofiño

(f)

\_\_\_\_\_  
Lic. Luis Furlán Collver

Fecha de aprobación: 2 de marzo de 1977.

Con gratitud y aprecio  
a mis profesores  
a mis compañeros  
a cuantos me ayudaron  
en la realización  
de este trabajo

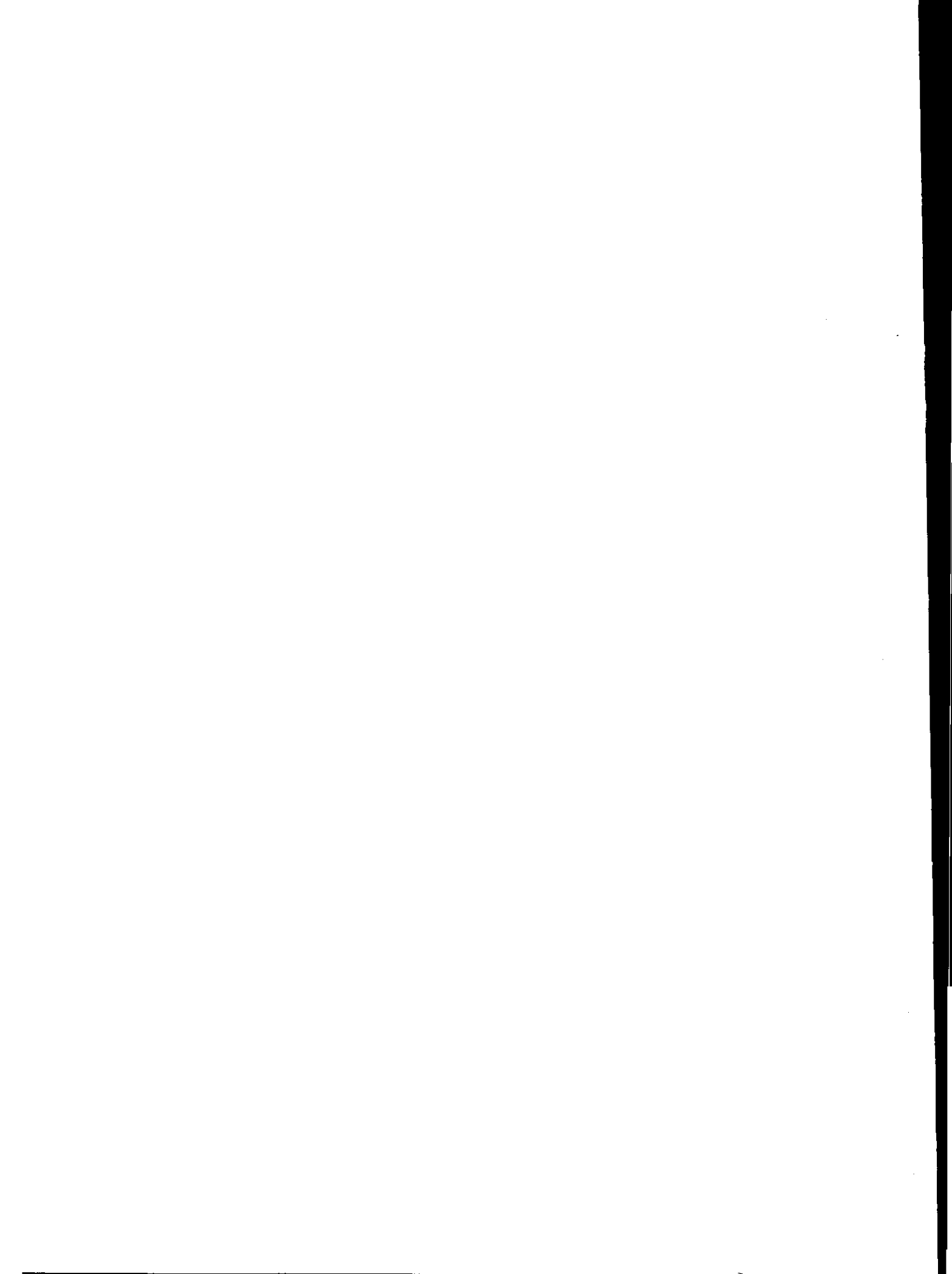
## INDICE

	Página
I. INTRODUCCION	1
A. Presentación	1
B. Historia	1
C. Ecuaciones de Laue	3
II. LA LEY DE BRAGG	9
A. Desarrollo teórico	9
B. Cotejo con las ecuaciones de Laue	11
III. DESCRIPCION DE LOS APARATOS	15
A. Fuente de potencia	15
B. Emisor de microondas	16
C. Receptor de microondas	18
D. Osciloscopio	18
E. Mesa con brazos giratorios	22
F. Macrocrystal	24
IV. DETERMINACION DE LA LONGITUD DE ONDA DE LA MICROONDA	27
V. MONTAJE DEL EXPERIMENTO	29
VI. REALIZACION DEL EXPERIMENTO	37
A. Medición de la amplitud de la micro-onda sin macrocrystal	37
B. Medición de la amplitud de la micro-onda con el macrocrystal $M_1$ interpuesto	40
1. Posición (100)	40
2. Posición (110)	46
3. Posición (120)	50
4. Posición (130)	54
5. Posición (230)	58
C. Medición de la amplitud de la micro-onda con el macrocrystal $M_2$ interpuesto	62
1. Posición (100)	62
2. Posición (110)	66
3. Posición (120)	70

	Página
VII. ERRORES	75
A. Errores mecánicos	75
B. Errores subjetivos	76
VIII. CONCLUSION	79
A. Sumario	79
B. Comparación de los datos teóricos y experimentales	79
C. Utilidad práctica del experimento	81
BIBLIOGRAFIA	83
APENDICES	85
A. Valores de las amplitudes de la microonda sin macrocristal	85
B. Valor de la amplitud de la microonda presente el macrocristal	87
C. Valores de la amplitud de la microonda presente el macrocristal M <sub>1</sub> en la posición (100)	89
D. Valores de la amplitud de la micro- onda presente el macrocristal M <sub>1</sub> en las posiciones (110), (120), (130), (230)	89
E. Valores de la amplitud de la micro- onda presente el macrocristal M <sub>2</sub> en las posiciones (100), (110), (120)	91

## LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
3.1	Transparencia de los materiales a las microondas	24
5.1	Distancia entre los planos en $M_1$	32
5.2	Distancia entre los planos en $M_2$	33
5.3	Valor de $\sigma_x$ para cada ángulo de reflexión	34
5.4	Ángulos teóricos de reflexión para $M_1$	35
5.5	Ángulos teóricos de reflexión para $M_2$	36
6.1	Ángulos teóricos y experimentales para $M_1$ en (100)	40
6.2	Ángulos teóricos y experimentales para $M_1$ en (110)	46
6.3	Ángulos teóricos y experimentales para $M_1$ en (120)	50
6.4	Ángulos teóricos y experimentales para $M_1$ en (130)	54
6.5	Ángulos teóricos y experimentales para $M_1$ en (230)	58
6.6	Ángulos teóricos y experimentales para $M_2$ en (100)	62
6.7	Ángulos teóricos y experimentales para $M_2$ en (110)	66
6.8	Ángulos teóricos y experimentales para $M_2$ en (120)	70
8.1	Comparación entre datos teóricos y experimentales	80



## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica		Página
6.1	Difracción de las microondas en ausencia del macrocristal	39
6.2	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (100)	41
6.3A	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (100)	43
6.3B	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (100)	45
6.4	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (110)	47
6.5	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (110)	49
6.6	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (120)	51
6.7	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (120)	53
6.8	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (130)	55
6.9	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (130)	57
6.10	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (230)	59
6.11	Difracción de microondas en el macrocristal $M_1$ con orientación (230)	61

Gráfica		Página
6.12	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (100)	63
6.13	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (100)	65
6.14	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (110)	67
6.15	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (110)	69
6.16	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (120)	71
6.17	Difracción de microondas en el macrocristal $M_2$ con orientación (120)	73

## I. INTRODUCCION

### A. Presentación.

La ley de Bragg se refiere a los cristales naturales observados con rayos X y se expresa por la fórmula

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda$$

donde

- $hkl$  son los índices de Miller, que determinan la orientación del cristal;
- $d_{hkl}$  es la distancia entre dos planos sucesivos de la retícula cristalina;
- $\theta$  es el ángulo entre el rayo incidente y el plano de la retícula;
- $n = 1, 2, 3, \dots$  es el orden de refracción;
- $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X empleados.

Por medio del presente experimento se quiere ver hasta qué punto es posible obtener resultados que satisfagan la ley de Bragg, trabajando con una retícula de esferas metálicas, con microondas y con parte de los aparatos de fabricación casera.

### B. Historia.

La ley de Bragg es fruto de una lenta evolución a través de los siglos, que empezó cuando el hombre definió el cristal ( calcita y cuarzo) como un trozo de hielo que, después de muchos años, ha perdido la propiedad de fundirse a la temperatura ambiente, aunque ésta sea superior a los cero grados.

El conocimiento científico de los cristales empezó en

1540, cuando Vannuccio Biringuccio de Sena descubre que " los ángulos entre las caras de los cristales de la misma especie son siempre iguales".

El descubrimiento fue reconocido por Nicolás Steno en 1669 y por Romé de l'Isle en 1793.

Evidentemente los comienzos fueron muy lentos.

Sin embargo, estas "observaciones" fueron despertando la búsqueda de la causa del hecho observado y, en 1784, René Juste Haüy de Saint Juste, partiendo de la exfoliación de los cristales de calcita, llegó al concepto de " moléculas integrantes ", es decir, " partículas poliédricas, de forma determinada para cada especie cristalina, cuya unión en edificios ordenados constituye el cristal ", como expresó en su " Essai d'une théorie sur la structure des cristaux ".

La ley de Haüy de los índices afirma que las direcciones de las caras de los cristales son tales que, con referencia a sus aristas, tienen índices expresables por números enteros y pequeños.

En 1850, August Bravais de Annonay, en " Etudes cristallographiques ", manifestaba su teoría de que " en un cristal las moléculas son todas iguales e igualmente orientadas, y cada una está rodeada de las demás en forma tal que los puntos homólogos de todas ocupan los vértices de una retícula espacial ".

Además, los estudios de Robert Hooke ( *Micrographia* ), de Erasmo Bartolino ( *Experimenta crystalli Islandici* ), de Christiaan Huyguens ( *Traité de la lumière* ), la observación de la formación de los cristales al microscopio por Leenwonhoek, dieron más cuerpo a la teoría cristalina.

Al comienzo del siglo XX, sin embargo, los conocimientos de la verdadera estructura cristalina eran puramente teóricos.

En 1912, Max Von Laue tuvo la idea de buscar experimentalmente si fuera posible obtener fenómenos de difracción empleando rayos X que atravesaran láminas cristalinas. El éxito del experimento habría demostrado dos cosas: por un lado, la naturaleza oscilatoria de los rayos X, y por otro, la existencia de una retícula cristalina, es decir, de moléculas ordenadamente distribuidas en el espacio.

Así como - razonó Laue - un haz de luz que llegue a una pantalla con perforaciones regularmente distribuidas y con una distancia entre ellas del mismo orden que la longitud de onda del haz luminoso está sujeto a fenómenos de difracción e interferencia, del mismo modo los rayos X al atravesar un cristal darán origen a una difracción, siempre que la distancia entre los átomos en el cristal y la longitud de onda de los rayos X sean del mismo orden.

El experimento, llevado a cabo por Friedrich y Knipping, salió perfectamente y permitió un conocimiento casi directo de la estructura cristalina.

### C. Ecuaciones de Laue.

El desarrollo matemático de Laue es el siguiente: supongamos un haz de rayos X ( fig. 1.1 ) incidente sobre una fila de átomos en una dimensión, siendo la distancia interatómica "a" y los frentes de onda paralelos a dicha fila de átomos, entonces la envoltura de las ondas emitidas por cada átomo forma nuevas crestas de ondas y vemos que, además del

rayo que se propaga en la misma dirección que el rayo incidente (orden cero), hay otros rayos difractados en diferentes direcciones (primero, segundo, ... orden).

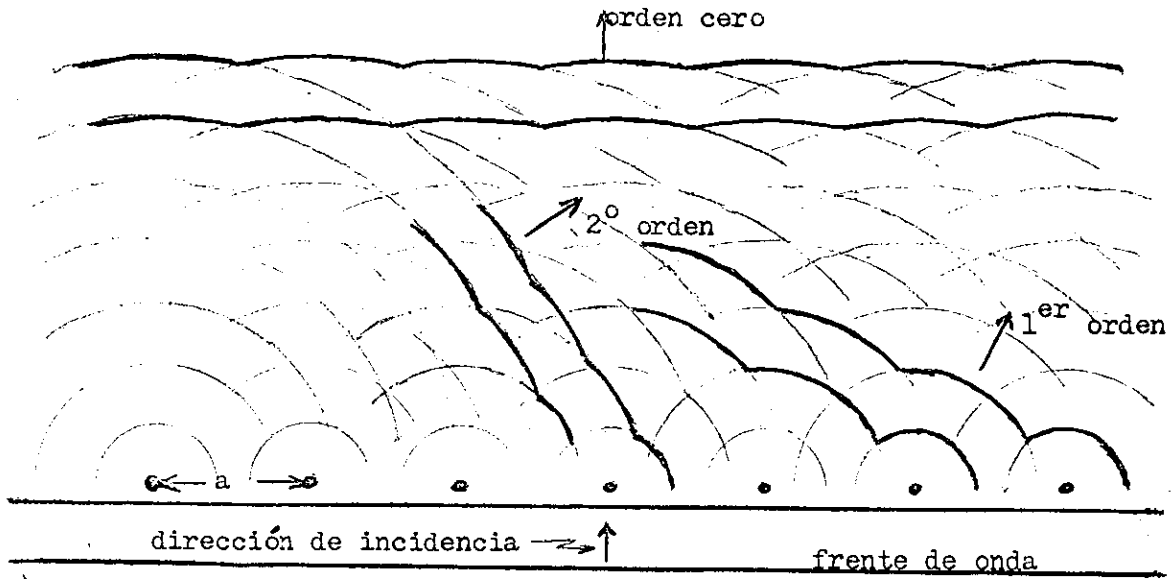


Fig. 1.1

Como resultado, habrá solamente pocas direcciones en que estos rayos se reforzarán mutuamente, aunque cada átomo irradie en toda dirección.

La condición para que exista uno de tales rayos se deduce de suponer (fig. 1.2) que AB sea el frente de onda del rayo incidente y CD el frente de onda del rayo difractado.

Ahora bien, el frente de onda está formado por un conjunto de puntos adyacentes que tienen la misma fase, lo cual requiere que la diferencia de recorrido,  $AC - BD$ , sea igual a un múltiplo entero de la longitud de onda del rayo, o sea, habrá interferencia constructiva en una determinada dirección siempre que se cumpla la condición

$$AC - BD = e\lambda \quad (e = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.1)$$

o, en términos de cosenos de ángulos,

$$a (\cos \alpha - \cos \alpha_0) = e\lambda \quad (1.2)$$

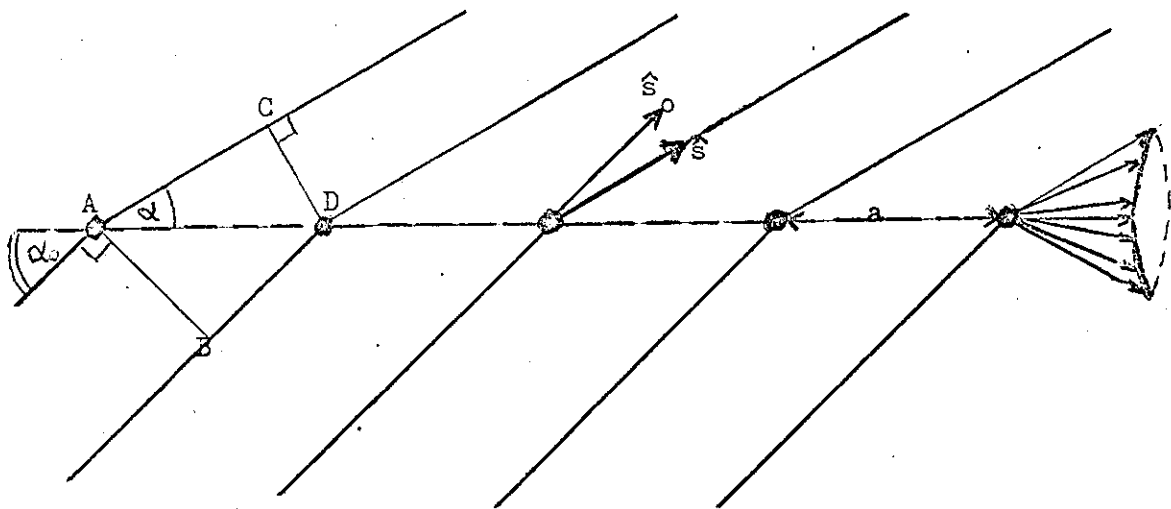


Fig. 1.2

Para una dirección dada de incidencia  $\alpha_0$ , una distancia reticular  $a$ , una determinada longitud de onda  $\lambda$  y un valor entero de  $e$ , existe un solo ángulo posible de difracción constructiva, sujeto naturalmente a la condición:  $\cos \alpha \leq 1$ .

Este ángulo define un cono de rayos con eje en la línea de átomos de la red. Entonces, un haz monocromático de rayos X que incida en una fila de átomos origina una familia

de conos que representan las direcciones de los rayos difractados.

La ecuación (1.1) puede también escribirse, usando la notación vectorial,

$$\underline{a} \cdot (\hat{s} - \hat{s}_0) = e\lambda \quad (1.3)$$

en donde

$\underline{a}$  representa el vector de traslación de A a D,  $\hat{s}$  y  $\hat{s}_0$  representan vectores unitarios en dirección del rayo incidente y del rayo refractado, respectivamente.

En el caso de una retícula de dos dimensiones, se necesita una segunda ecuación similar a la (1.1). Las direcciones permitidas de interferencia constructiva se encuentran a lo largo de la intersección de los dos conos ( uno por cada dimensión ), y el número posible de rayos difractados queda notablemente limitado.

En la retícula de tres dimensiones, las condiciones para una difracción constructiva se hacen aún más estrictas, pues habrá que satisfacer simultáneamente las tres ecuaciones de Laue

$$\begin{aligned} \underline{a} \cdot (\hat{s} - \hat{s}_0) &= e\lambda \\ \underline{b} \cdot (\hat{s} - \hat{s}_0) &= f\lambda \\ \underline{c} \cdot (\hat{s} - \hat{s}_0) &= g\lambda \end{aligned} \quad (1.4)$$

Ahora bien, e, f, g son enteros y  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$ ,  $\underline{c}$  representan las componentes de la traslación de un punto de la retícula al diagonalmente contiguo.

Las tres ecuaciones (1.4) indican que la difracción está condicionada por los cosenos de los ángulos entre el vector  $\hat{s} - \hat{s}_0$  y los ejes de los cristales, pues podemos identifica-

mente escribir

$$\begin{aligned}
 a ( \cos \alpha - \cos \alpha_0 ) &= e \lambda \\
 b ( \cos \beta - \cos \beta_0 ) &= f \lambda \\
 c ( \cos \gamma - \cos \gamma_0 ) &= g \lambda
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

Hay que notar que para determinados valores de  $\lambda$  y  $s_0$ , la ecuaciones (1.4) no necesariamente tienen solución, o sea, dado un haz monocromático de rayos X, la difracción se observará solamente para ciertos ángulos de incidencia.

Precisamente esta limitación es la que hace que la difracción de los rayos X a través de los cristales sea un instrumento sumamente útil para investigar las estructuras cristalinas.



## II. LA LEY DE BRAGG

### A. Desarrollo teórico.

La teoría de Von Laue fue desarrollada más tarde por William Henry y Laurence Henry Bragg, padre e hijo respectivamente, quienes consideraron la difracción de los rayos X en un cristal como una reflexión de los mismos por los planos atómicos.

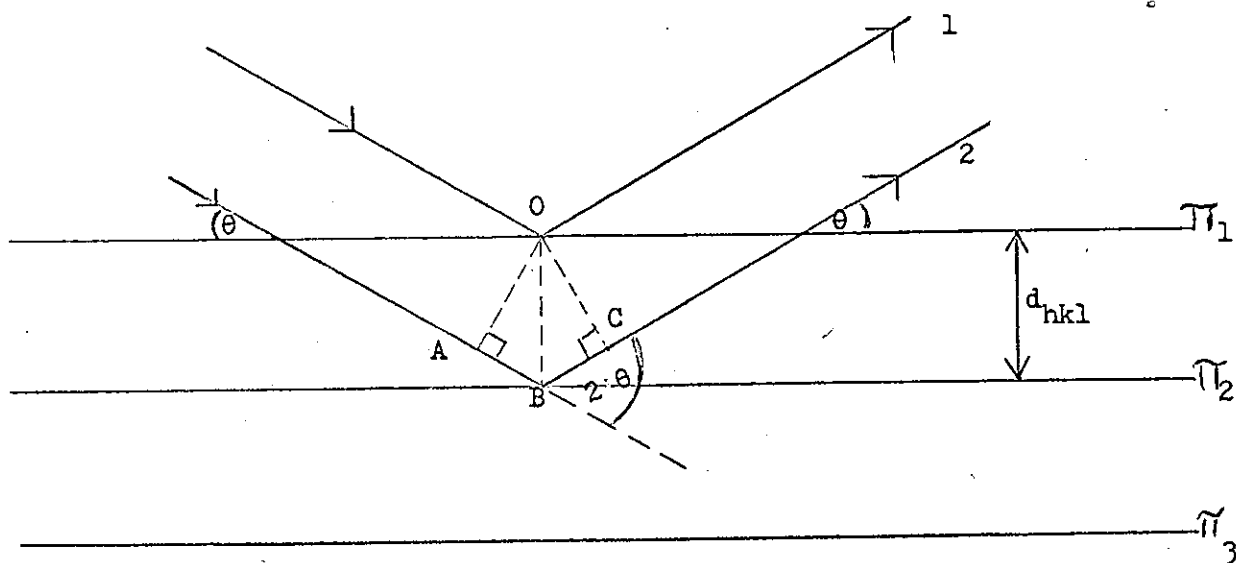


Fig. 2.1

Consideremos ( fig. 2.1 ) un conjunto de planos atómicos  $\pi_1$ ,  $\pi_2$ ,  $\pi_3$  con índices de Miller  $(hkl)$ , siendo la distancia entre dos planos sucesivos  $d_{hkl}$ .

Cada plano refleja parcialmente los rayos X según la ley de Snell:

a- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano;

b- El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales.

Los rayos 1 y 2, reflejados por planos sucesivos, se refuerzan mutuamente sólo si la diferencia de sus recorridos es un múltiplo de  $\lambda$ , pues los frentes de ondas son puntos de igual fase.

La diferencia de recorrido para los rayos reflejados por planos paralelos es

$$AB + BC = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta = 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

$\Rightarrow AB + BC = n\lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta$   
El valor de  $n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) indica el orden de la reflexión.

Esta fórmula constituye la llamada LEY DE BRAGG y de ella se deduce inmediatamente que, para valores dados de  $d_{hkl}$  y  $\lambda$ , y  $n$  con un determinado valor entero, sólo un ángulo particular  $\theta$  puede producir la reflexión.

De

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda$$

se sigue que

$$\sin \theta = \frac{n \lambda}{2 d_{hkl}} \quad (2.2)$$

o sea, conociendo  $\lambda$ ,  $d_{hkl}$ , y fijando  $n$  es posible calcular qué ángulo  $\theta$  dará reflexión.

La ley de Bragg no toma en cuenta la pérdida de amplitud de la onda reflejada con respecto a la onda incidente, sino que predice únicamente cuándo habrá reflexión.

También, por ser  $\sin \theta \leq 1$ , la fórmula de Bragg indica que habrá reflexión posible sólo si  $\lambda \leq 2 d_{hkl}$ .

B. Cotejo con las ecuaciones de Laue.

Podemos ahora deducir la ley de Bragg de las ecuaciones de Laue.

Para eso, hacemos en las ecuaciones (1.5)

$$\hat{s} - \hat{s}_0 = \underline{S}$$

y, por ser  $|\hat{s}| = |\hat{s}_0|$  ( la intensidad del rayo refractado es, en el límite, igual a la intensidad del rayo incidente ), podemos pensar en un plano reflector que bisecte el ángulo  $2\theta$  entre el rayo incidente y el refractado.

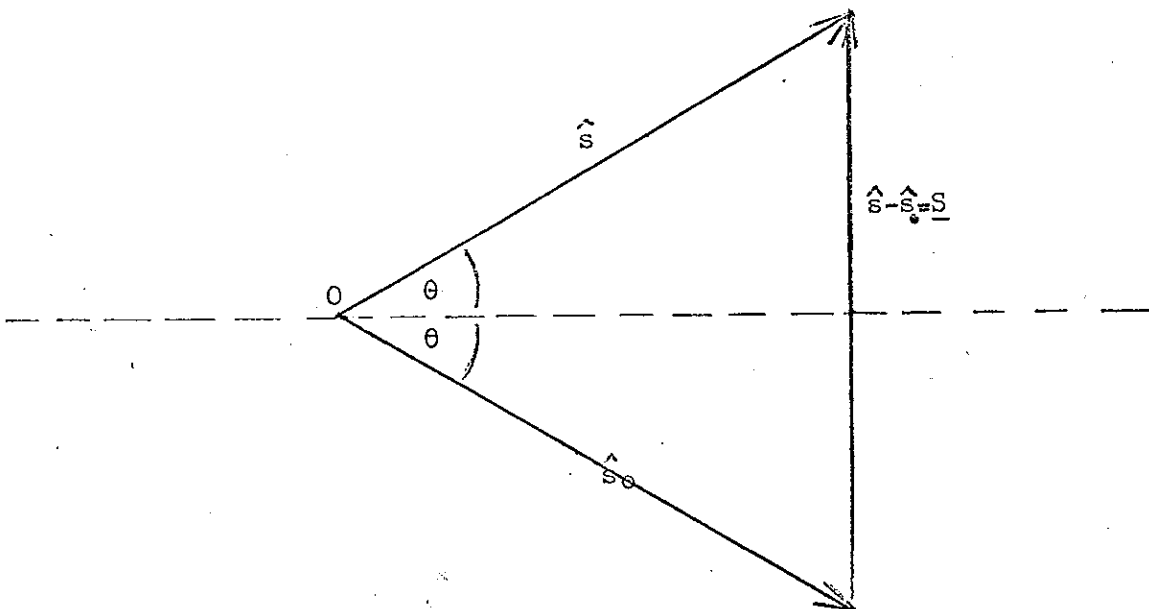


Fig. 2.2

Obtenemos ( fig. 2.2 ) un plano reflector, respecto al cual el rayo refractado pasa a ser rayo reflejado. El nuevo plano reflector es perpendicular a  $\underline{S}$ .

Las ecuaciones (1.5) pueden escribirse

$$\begin{aligned}
 \underline{a} \cdot \underline{S} &= e \lambda = a / \underline{S} / \cos \alpha \\
 \underline{b} \cdot \underline{S} &= f \lambda = b / \underline{S} / \cos \beta \\
 \underline{c} \cdot \underline{S} &= g \lambda = c / \underline{S} / \cos \gamma
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

De aquí

$$\cos \alpha : \cos \beta : \cos \gamma = \frac{e \lambda}{a S} : \frac{f \lambda}{b S} : \frac{g \lambda}{c S}$$

Simplificando,

$$\cos \alpha : \cos \beta : \cos \gamma = \frac{e}{a} : \frac{f}{b} : \frac{g}{c}$$

Llamando  $m$  al máximo común divisor de  $e, f, g$ , escribimos

$$\cos \alpha : \cos \beta : \cos \gamma = \frac{m h}{a} : \frac{m k}{b} : \frac{m l}{c}$$

Por último:

$$\cos \alpha : \cos \beta : \cos \gamma = \frac{h}{a} : \frac{k}{b} : \frac{l}{c} \tag{2.4}$$

Pero el lado derecho de (2.4) representa precisamente los cosenos directores de la normal unitaria  $\hat{n}$  al plano  $(hkl)$ , lo cual quiere decir que  $\underline{S}$  y  $\hat{n}$  tienen la misma dirección:  $\underline{S}$  es perpendicular a  $(hkl)$  y el plano de reflexión es el plano  $(hkl)$ . Ver fig. 2.3.

Siendo  $/\underline{S}/ = 2 \sin \theta$  ( fig. 2.2) tendremos

$$\underline{a} \cdot \underline{S} = \underline{a} \cdot \hat{n} / \underline{S} / = \underline{a} \cdot \hat{n} \cdot 2 \sin \theta = \frac{e}{m} \lambda \tag{2.5}$$

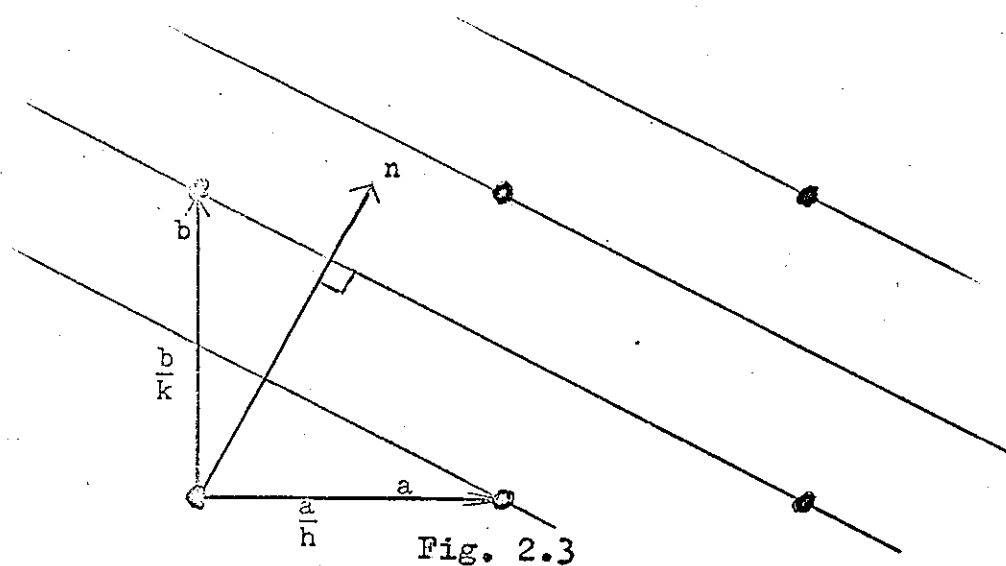
y finalmente

$$2 \bar{a}_{hkl} \sin \theta = m \lambda \tag{2.6}$$

que nos dice que la difracción de Laue equivale a la reflexión de Bragg por el plano  $(hkl)$  de Miller.

Nos interesa la distancia entre dos planos sucesivos,

con la simplificación, además, de que  $a = b = c$  y que el plano  $(hkl)$  sea ~~normal~~ <sup>paralelo</sup> al eje de las  $z$ , es decir, que  $l = 0$ .



Se trata entonces de hallar la distancia entre el punto  $(00)$  y la recta  $AB$ , fig. 2.4, eliminando una dimensión.

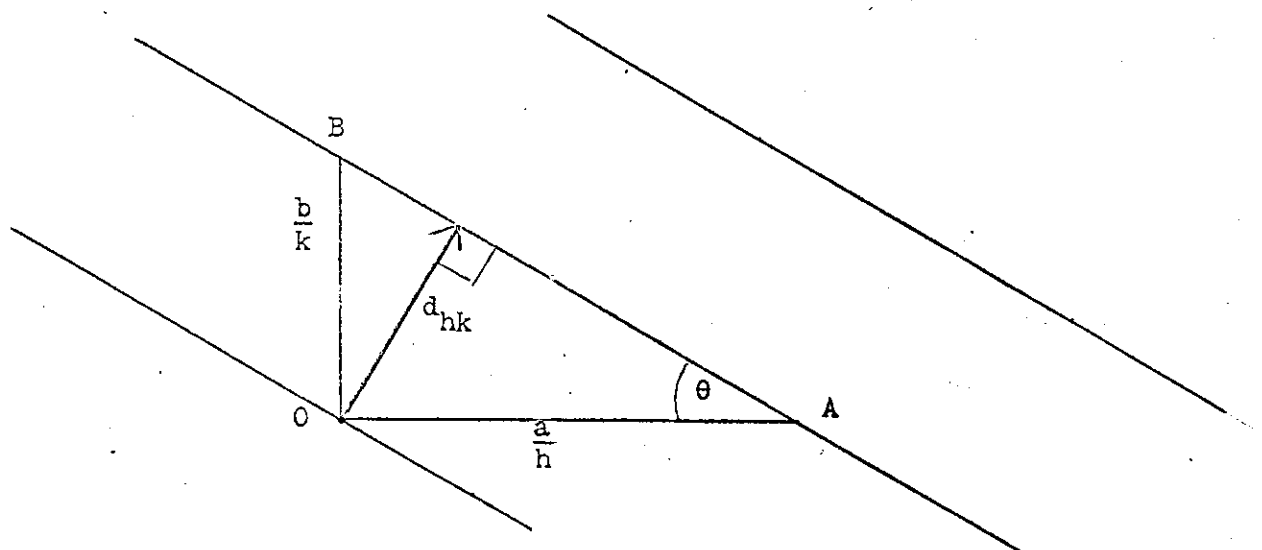


Fig. 2.4

Dado el triángulo  $ABO$ , tenemos que  $AO = a/h$  y  $BO = a/k$ ,

por definición de los índices de Miller.

La distancia normal entre dos planos sucesivos es

$$d_{hk} = (a/h) \text{ sen } (\text{OAB})$$

$$d_{hk} = (a/h) \frac{a/k}{\left(\frac{a^2}{h^2} + \frac{a^2}{k^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$d_{hk} = \frac{a^2}{h k} \frac{1}{\left(\frac{h^2 + k^2}{h^2 k^2} a^2\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$d_{hk} = \frac{a^2 h k}{a h k} \frac{1}{(h^2 + k^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$d_{hk} = \frac{a}{(h^2 + k^2)^{\frac{1}{2}}}$$

(2.7)

### III. DESCRIPCION DE LOS APARATOS

La finalidad de este experimento es aplicar la ley de Bragg a fenómenos macroscópicos, es decir, que en lugar de rayos X y átomos con longitud de onda y distancias del orden de  $1 \text{ \AA}$ , trabajemos con microondas y esferas metálicas con longitudes de onda y distancias del orden de centímetros.

Al efecto se necesita de los siguiente aparatos: fuente de potencia, emisor de microondas, receptor de microondas, osciloscopio, mesa con brazos giratorios, macrocristal de esferas metálicas.

#### A. Fuente de potencia, marca Heathkit, modelo IP-17.

La carátula aparece en la figura 3.1.

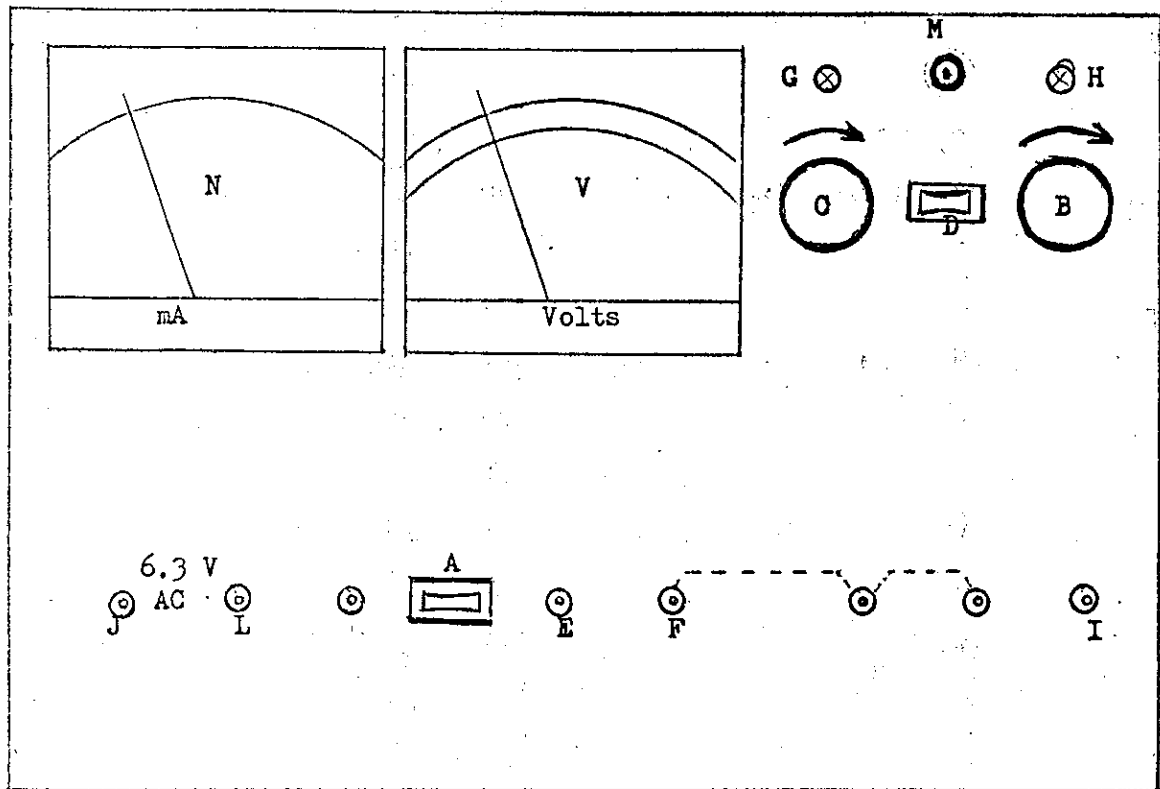


Fig. 3.1

- 'A' es el interruptor general;
- 'M' es el interruptor que conecta la fuente de corriente continua después que se ha encendido el aparato;
- 'J' y 'L' son los bornes de corriente alterna de 6.3 voltios para calentar el cátodo;
- 'F' es el común de tierra;
- 'E' y 'F' son bornes entre los cuales hay una diferencia de potencial de 0 - 100 voltios CC, regulable mediante la perilla 'C';
- 'F' e 'I' son bornes entre los cuales hay una diferencia de potencial de 0 - 400 voltios CC, regulable mediante la perilla 'B';
- 'D' es un interruptor cuya palanca, bajada hacia la izquierda, permite leer en el voltímetro 'V' la diferencia de potencial que se regula por 'C', mientras el foquito 'G' encendido indica que está funcionando este circuito; bajada hacia la derecha, conecta el voltímetro 'V' con la diferencia de potencial regulada por 'B', mientras el foquito 'H' encendido indica que está funcionando este circuito;
- 'N' es el miliamperímetro que marca la corriente de salida.

B. Emisor de microondas, marca Heathkit, modelo EPW-25.

Su parte principal es el 'clystrón', cuyo esquema aparece en la figura 3.2.

El clystrón consta de:

- cátodo 'C' que, calentado indirectamente, emite electrones;
- rejillas ' $r_1$ ' y ' $r_2$ ', conectadas entre sí por los extre-

mos y separadas una de otra por una distancia ' $d$ ', siendo ' $D$ ' la distancia entre la rejilla inferior y el cátodo, y ' $R$ ' el radio de la rejilla superior;

- placa reflectora ' $P$ ', separada de la rejilla superior por una distancia ' $L$ '.

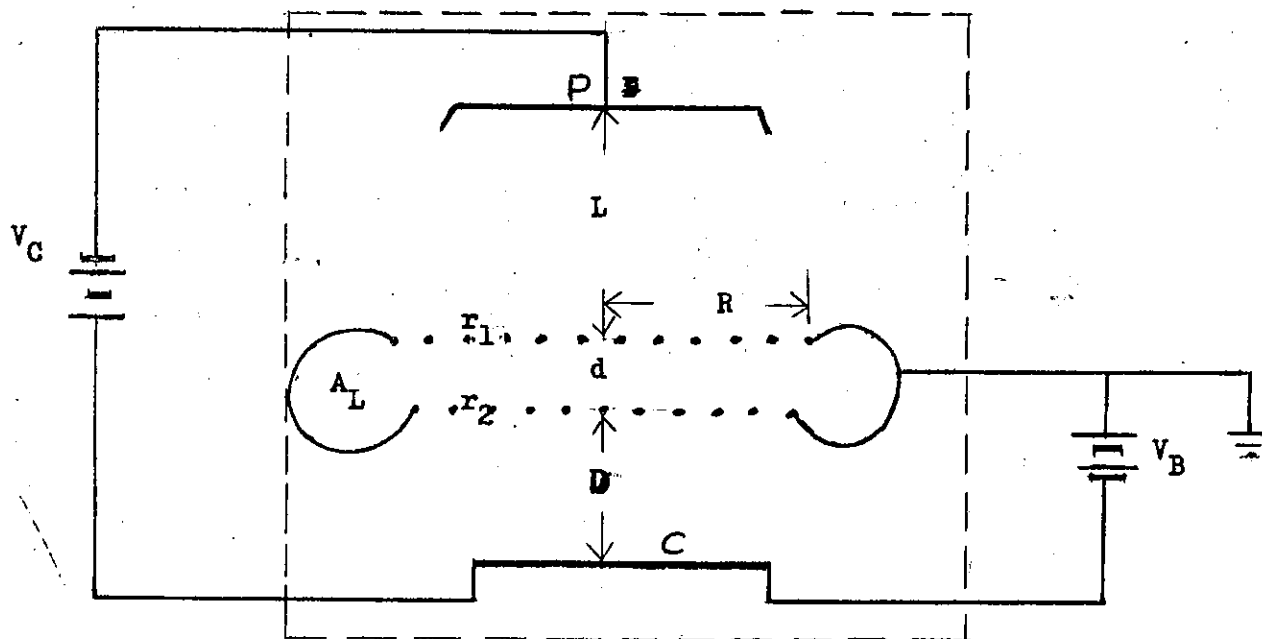


Fig. 3.2

Entre la placa reflectora y el cátodo hay una diferencia de potencial  $V_C$ , proporcionada por la fuente de potencia, que también proporciona la diferencia de potencial  $V_B$  entre el cátodo y las rejillas.

Las oscilaciones electromagnéticas son producidas por los electrones en su vaivén entre el cátodo ' $C$ ' y la placa reflectora ' $P$ '.

La frecuencia de las oscilaciones está comprendida entre 8.5 y 9.6 GHz, que corresponde a una longitud de onda alrededor de los 3 cm.

La longitud de onda es dada por la fórmula

$$\lambda_0 = \frac{2 \pi c}{\omega} = \sqrt{2 \pi \frac{A_L A_C}{R d}}$$

en donde

'A<sub>L</sub>' es el área de la sección transversal del toroide;

'A<sub>C</sub>' es el área de la rejilla superior;

'R' es el radio de la rejilla superior;

'd' es la distancia entre las rejillas.

Los electrones emitidos por el cátodo son acelerados por las rejillas, que están a +300 V con respecto al cátodo. Los electrones atraviesan las rejillas por el impulso que <sup>les dio</sup> ~~tienen~~ y se encuentran decelerados después por la atracción de las mismas rejillas y por la repulsión de la placa reflectora, que está a - 100 V con respecto del cátodo. Los electrones decelerados, al acercarse a la placa reflectora, invierten su dirección y vuelven a atravesar las rejillas en dirección del cátodo, que a su vez los repele, y el ciclo se repite.

C. Receptor de microondas, marca Heathkit, modelo EPW-25.

Es esencialmente un diodo que, colocado en el campo eléctrico oscilatorio de las microondas, envía la corriente inducida rectificada al osciloscopio ( u otro aparato medidor, como un galvanómetro ).

D. Osciloscopio, marca Heathkit, modelo 10-18.

La carátula aparece en la fig. 3.3.

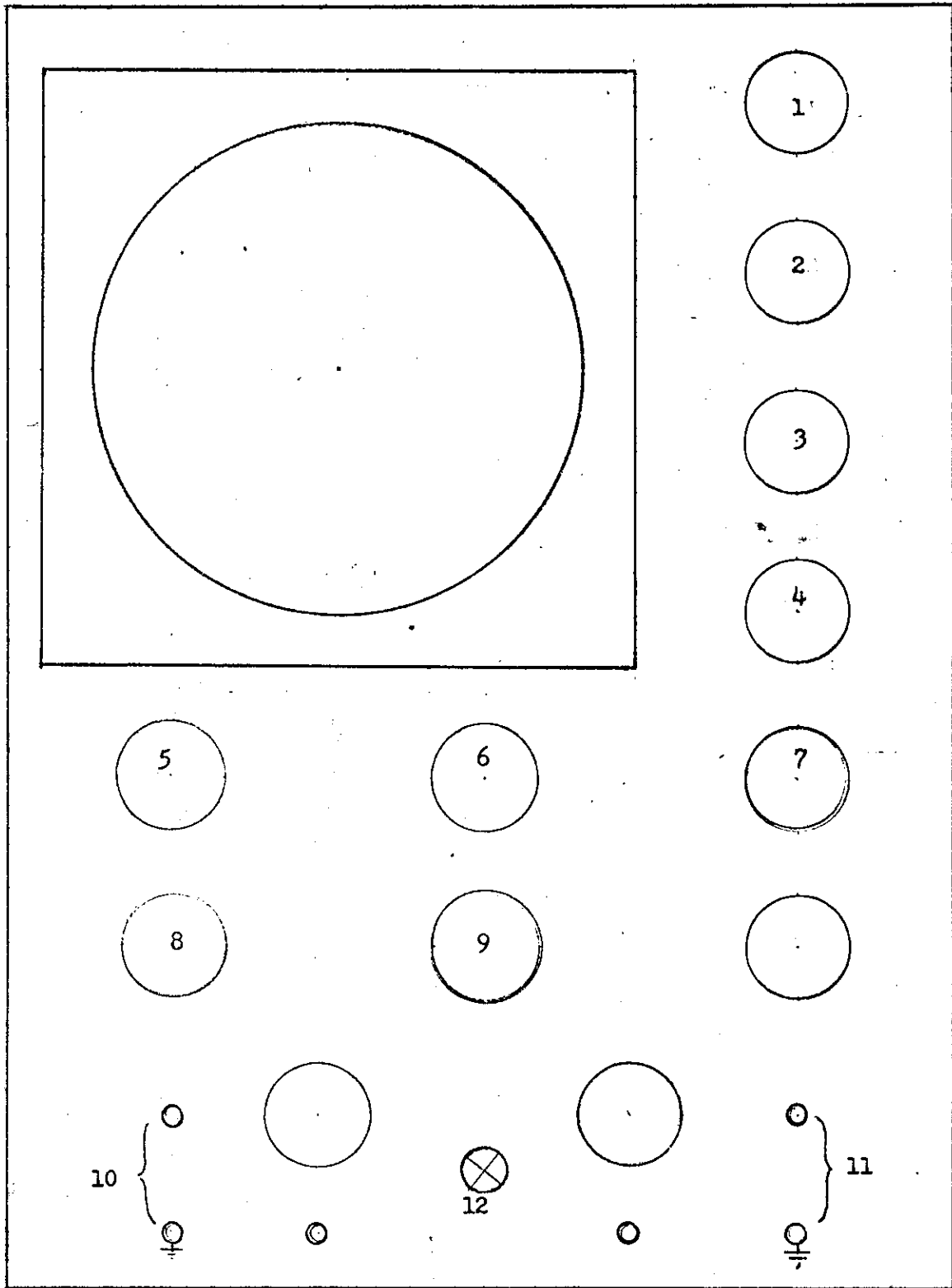


Fig. 3.3, carátula del osciloscopio.

- '1' es la perilla que funciona como interruptor y regulador de la intensidad luminosa de la imagen;
- '2' es la perilla para el enfoque de la imagen;
- '3' es la perilla para correr verticalmente la imagen;
- '5' es la perilla que regula la amplitud de onda;
- '8' es la perilla que gradúa la escala de lectura de la amplitud: en la posición 1X cada división de la escala vale 1, en la posición 10X cada división vale 10, en la posición 100X cada división vale 100;
- '6' es la perilla que permite escoger la banda de frecuencias de las oscilaciones horizontales internas del osciloscopio: 1-100, 100-1000, ...;
- '9' es la perilla que calibra la frecuencia dentro de una misma banda;
- '7' es la perilla que regula el ancho horizontal de la imagen;
- '10' son los bornes de entrada de la oscilación vertical;
- '11' son los bornes de entrada de la oscilación externa horizontal;
- '12' es el foco-espía de encendido.

La microonda, captada por el diodo receptor, es enviada a la entrada vertical '10' del osciloscopio, para medir la amplitud de la misma.

El esquema general de las conexiones para el funcionamiento del emisor de microondas está esquematizado en las figuras 3.4 y 3.5.

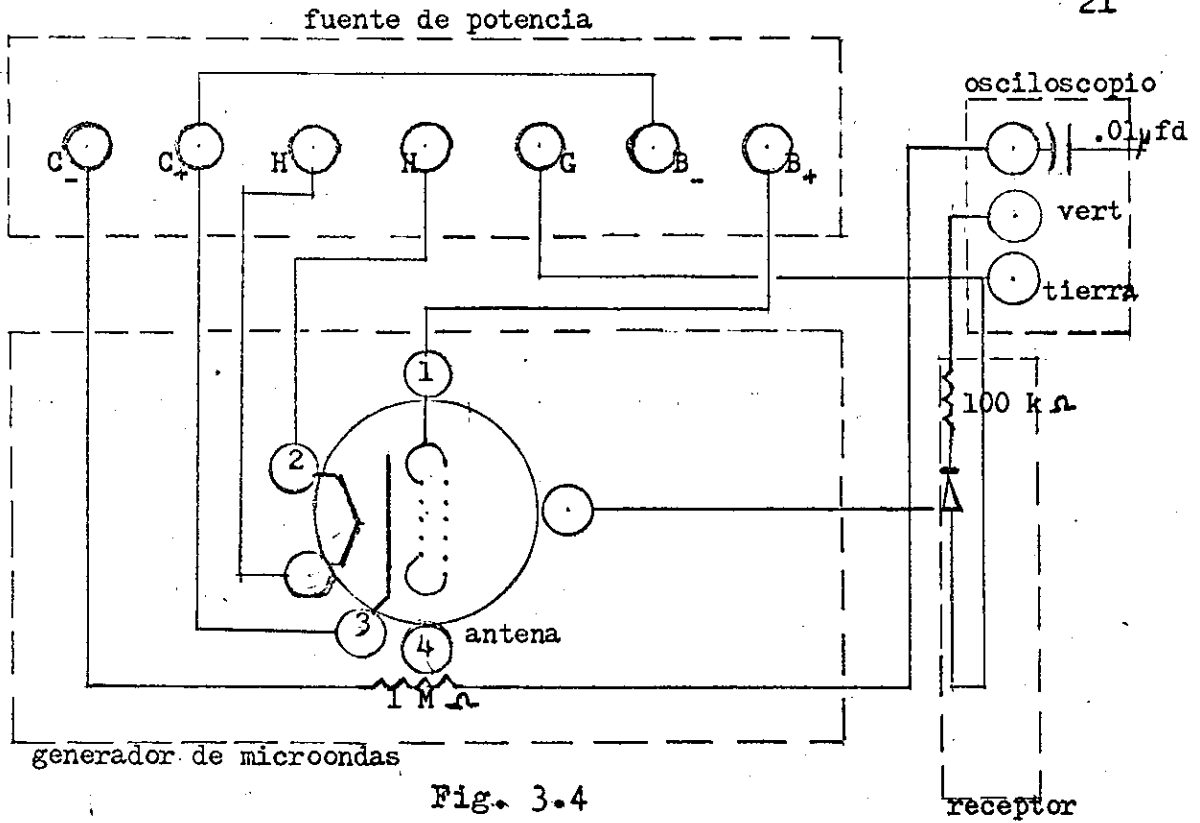


Fig. 3.4

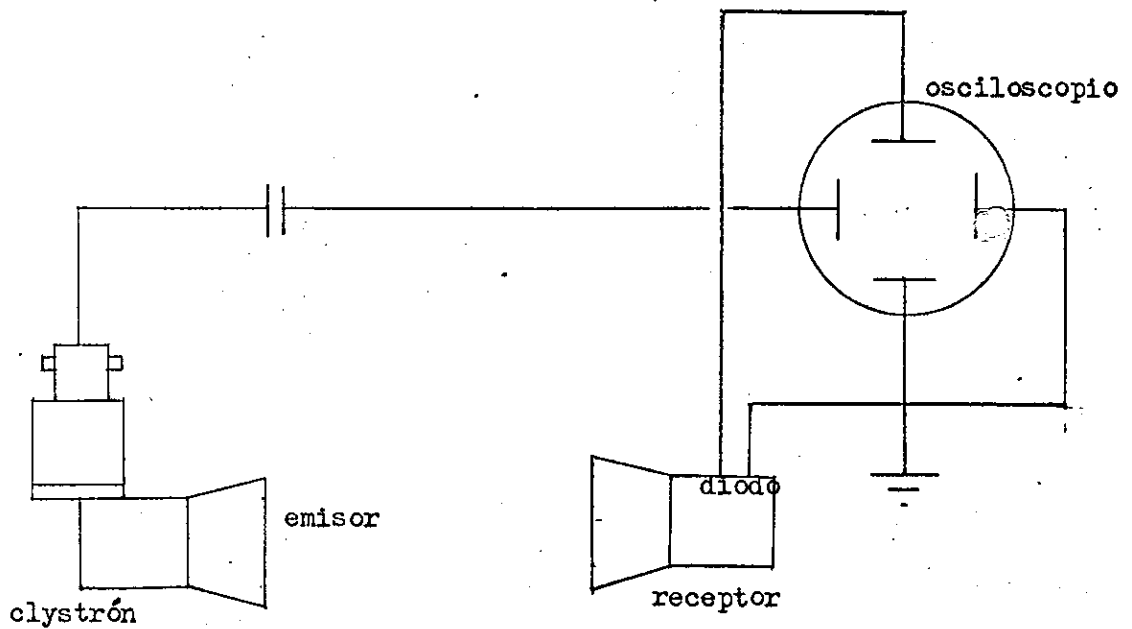


Fig. 3.5

E. Mesa con brazos giratorios.

Es de construcción casera. Sirve para sostener el macrocristal, el emisor y el receptor de microondas, el esquema aparece en las figuras 3.6 y 3.7.

Consta de un pie formado por un disco metálico (P) de 30 cm de diámetro y 1/4" de espesor, fijo en una base de madera; una columna metálica (C) de 31 cm de alto y 3 cm de diámetro; dos brazos metálicos (B' y B'') de 100 cm de largo y 1.5 cm de diámetro, soldados a sendos cojinetes en el extremo superior

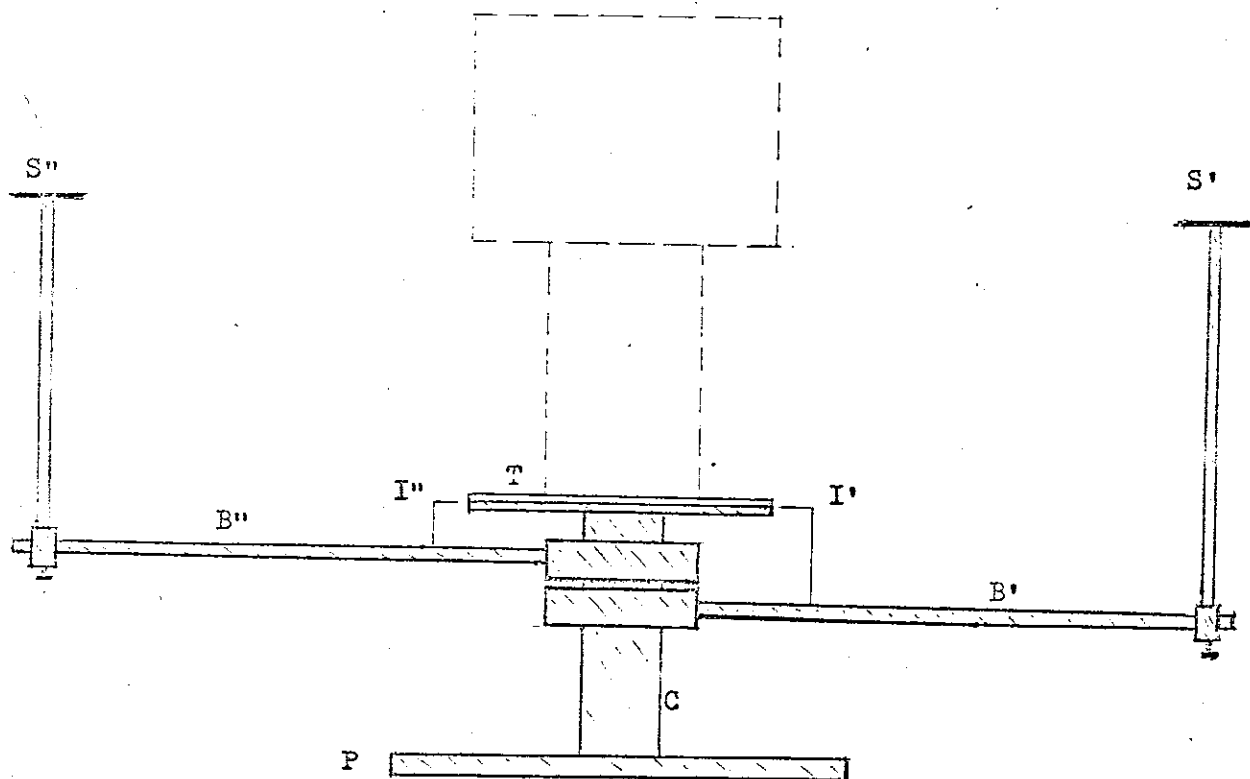


Fig. 3.6

superior de la columna (C); cada brazo lleva un sostén (S' y

S<sup>''</sup>) sobre el que se coloca el emisor o el receptor de microondas, siendo el alto de los sostenes 20 y 24 cm respectivamente y su diámetro 1.5 cm. Los sostenes llevan en su parte superior dos planchitas metálicas de 1" por 3", sobre las que se fija el emisor y el receptor.

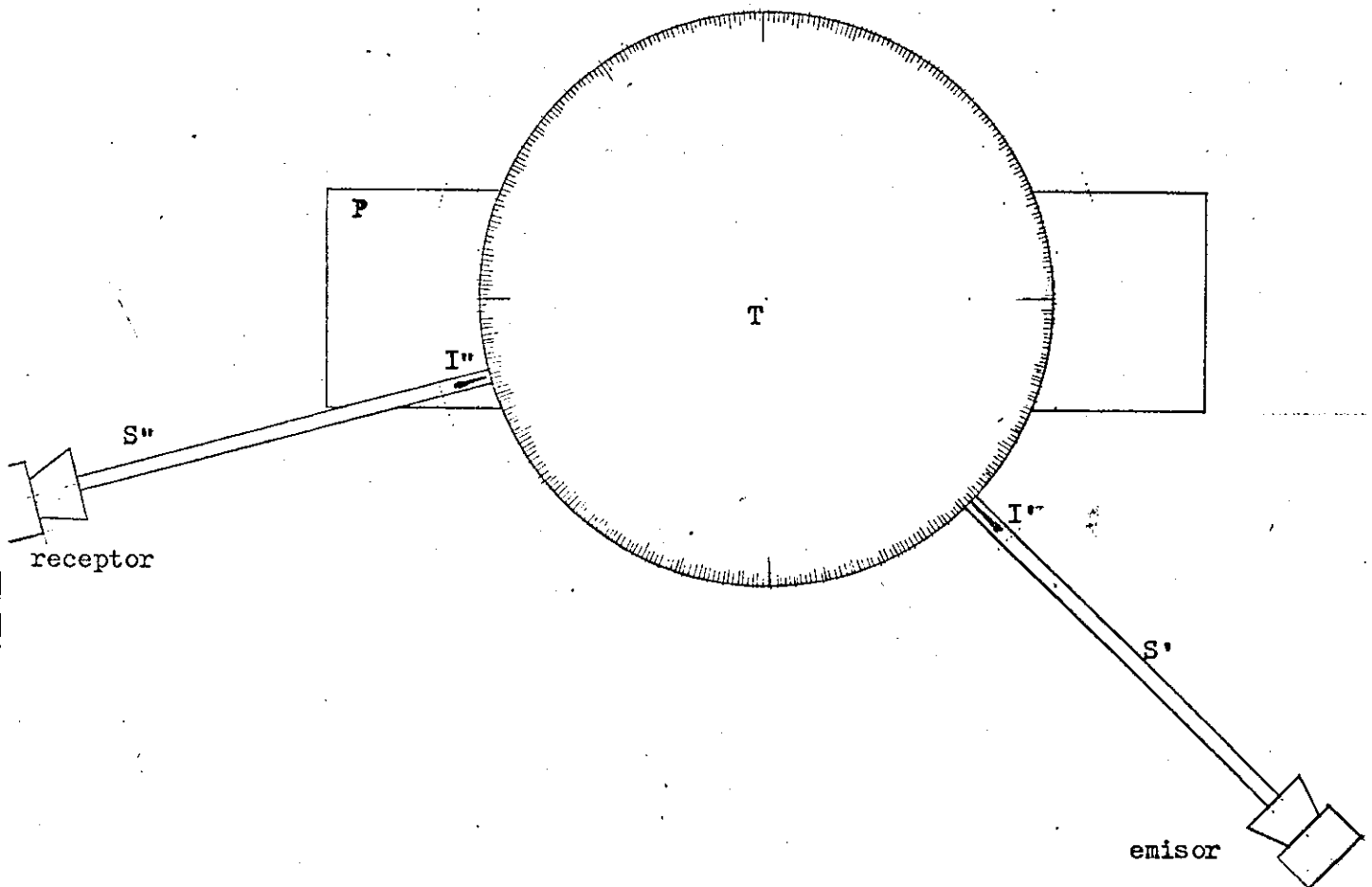


Fig. 3.7

La mesa (T) es un plato metálico de 1/4" de espesor y 10"

de diámetro, soldado sobre la columna C y sobre el que está pegado el goniómetro G del mismo diámetro que el plato.

Los índices I' e I" permiten leer en el goniómetro los ángulos que forman los brazos con el eje que se haya escogido.

La mesa T está a 14 cm por debajo de los soportes S' y S" para evitar lo más posible reflexiones indeseables de las microondas en las partes metálicas del conjunto experimental.

#### F. Macrocrystal.

Está formado por esferas metálicas embutidas en duropor a distancias regulares una de otra, formando varias capas.

El duropor se escogió después de una selección entre distintos materiales para encontrar el más transparente a las microondas. Al efecto, se colocaron varias muestras, una por una, entre emisor y receptor, situados éstos a 150 cm uno del otro. Sin material intermedio, la amplitud de onda en el osciloscopio fue de 360 divisiones. Con material intermedio, los promedios de las amplitudes observadas fueron los de la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Transparencia de los materiales a las microondas.

Material	Espesor (cm)	Amplitud (div)	% pérdidas
Madera (cedro)	4.8	50	86.11
Vidrio	.5	270	25.00
Papel	3.1	173	51.94
Duropor	5.00	360	0.00
Parafina	4.00	70	80.55

El esquema de la disposición de los aparatos aparece en la fig. 3.8.

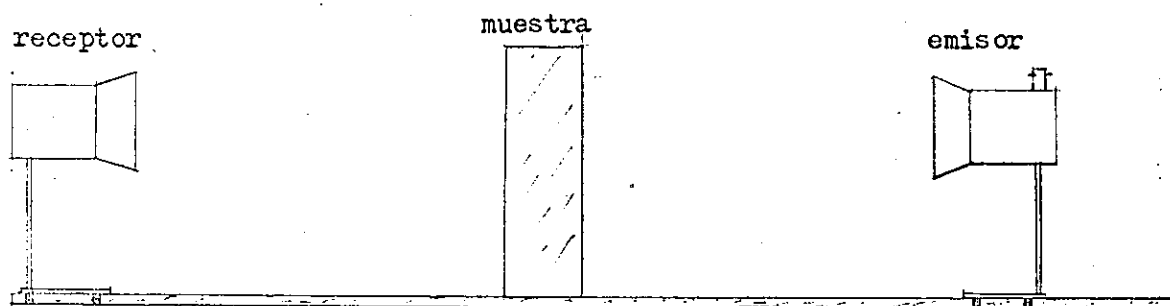


Fig. 3.8

Aunque el espesor de las diferentes muestras no fue igual para todas, el duropor resultó claramente satisfactorio sobre todos los otros materiales.

Un cubo de duropor de 25 x 25 x 25 cm interpuesto entre emisor y receptor de microondas dio una amplitud de paso de 352 divisiones, correspondiente a una pérdida de 2.22%, valor muy aceptable para nuestro experimento.

Una vez escogido el duropor, se cortaron cuatro formale-  
tas del mismo de 25 x 25 x 5 cm y se perforaron con trépa-  
no de alta velocidad y barreno de 1/4", haciendo perfora-  
ciones distanciadas entre sí (7.00±.05) cm, formando tres  
filas de cuatro columnas de hoyos en las caras de las forma-  
letas. Con un punzón cortante cónico adaptado al trépano se  
ensancharon los extremos de las perforaciones para que cupie-  
ran en ellos esferas metálicas de 2.33 cm de diámetro, de-  
jando el diámetro de las perforaciones un mm más pequeño

para que las esferas entraran a presión en el duropor. Se obtuvo así un macrocristal formado por tres planos horizontales de 3 x 4 esferas en cada plano.

En un segundo macrocristal, las medidas fueron de cuatro planos horizontales, cada uno con 5 x 5 esferas de 1.2 cm de diámetro a (5 $\pm$ .05) cm de distancia entre una y otra, siendo el cubo de sostén formado por cinco formaletas de 25 x 25 x 5 cm, debidamente perforadas para alojar las esferas.

#### IV. DETERMINACION DE LA LONGITUD DE ONDA EN LA MICROONDA

Para medir la longitud de onda se situaron el emisor y el receptor a 150 cm uno del otro sobre una regla graduada de 1" de ancho, de manera que los aparatos pudieran deslizarse a lo largo de una recta. Entre emisor y receptor se colocaron dos pantallas metálicas con ranuras verticales paralelas entre sí y perpendiculares al eje emisor-receptor.

Las ranuras tenían 5 cm de alto y .6 cm de ancho, y sus ejes longitudinales estaban distanciados entre sí 1 cm.

El clystrón de emisor estaba situado de tal manera que el campo eléctrico fuera vertical y el diodo del receptor estaba asimismo en posición vertical. Dejando una de las pantallas fijas y corriendo la otra a lo largo de la regla graduada, se observó en el osciloscopio un seguirse de máximos y mínimos de intensidad, habiendo dos máximos consecutivos cada media longitud de onda. Figura 4.1.

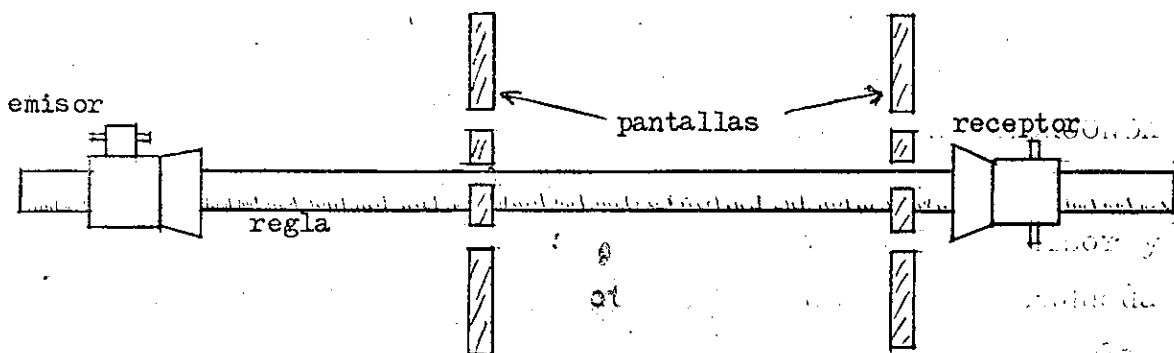


Fig. 4.1

la distancia recorrida por la pantalla móvil

Contando 20 máximos y dividiendo entre 10 se obtuvo un promedio de  $(3.39 \pm 0.01)$  cm para la longitud de onda de la microonda.

## V. MONTAJE DEL EXPERIMENTO

El montaje del experimento comprendió:

- a- Fijar el emisor y el receptor sobre los soportes S' y S'' respectivamente;
- b- Conectar los aparatos según indican las figuras 3.4 y 3.5;
- c- Colocar el macrocristal con esferas de 2.33 cm en el centro de la mesa T sobre una columna de duropor, de manera que estuviese a nivel con el emisor y el receptor.
- d- Orientar el macrocristal (fig. 5.1) por medio de plo-

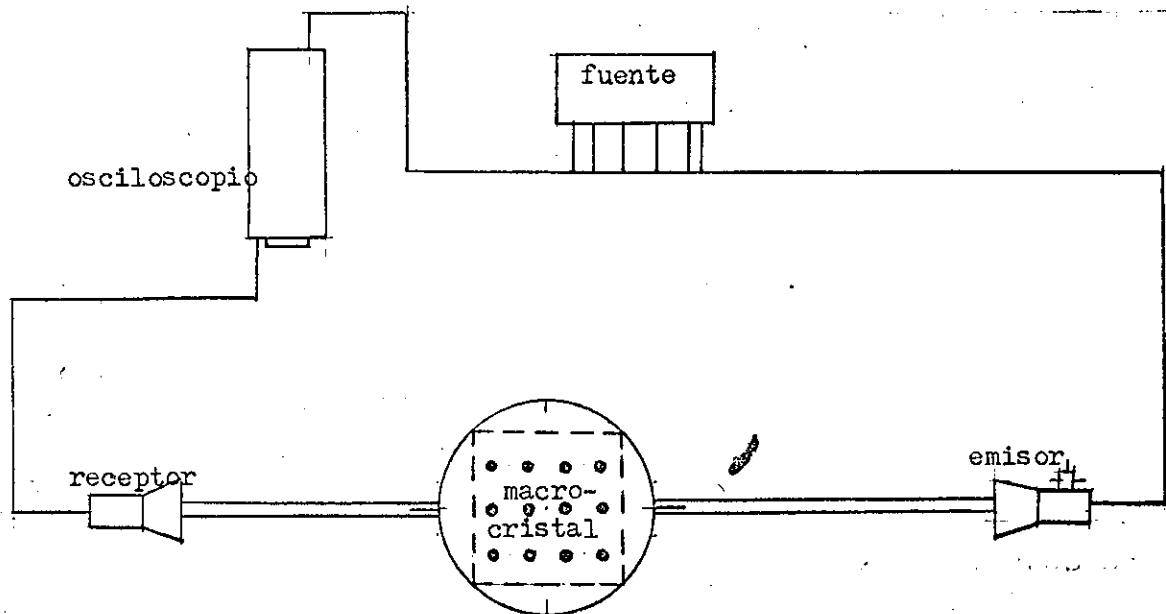


Fig. 5.1

madras de manera que el plano vertical central del macrocristal quedara paralelo al eje  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  del goniómetro, o sea, que el macrocristal estuviera en la posición (100).

Nótese que en este macrocristal la estructura no es cúbica sino tetragonal, sin embargo, por ser el parámetro  $l$  igual a 0, no afecta que  $c$  sea más corto, pues no se toma en cuenta en los cálculos.

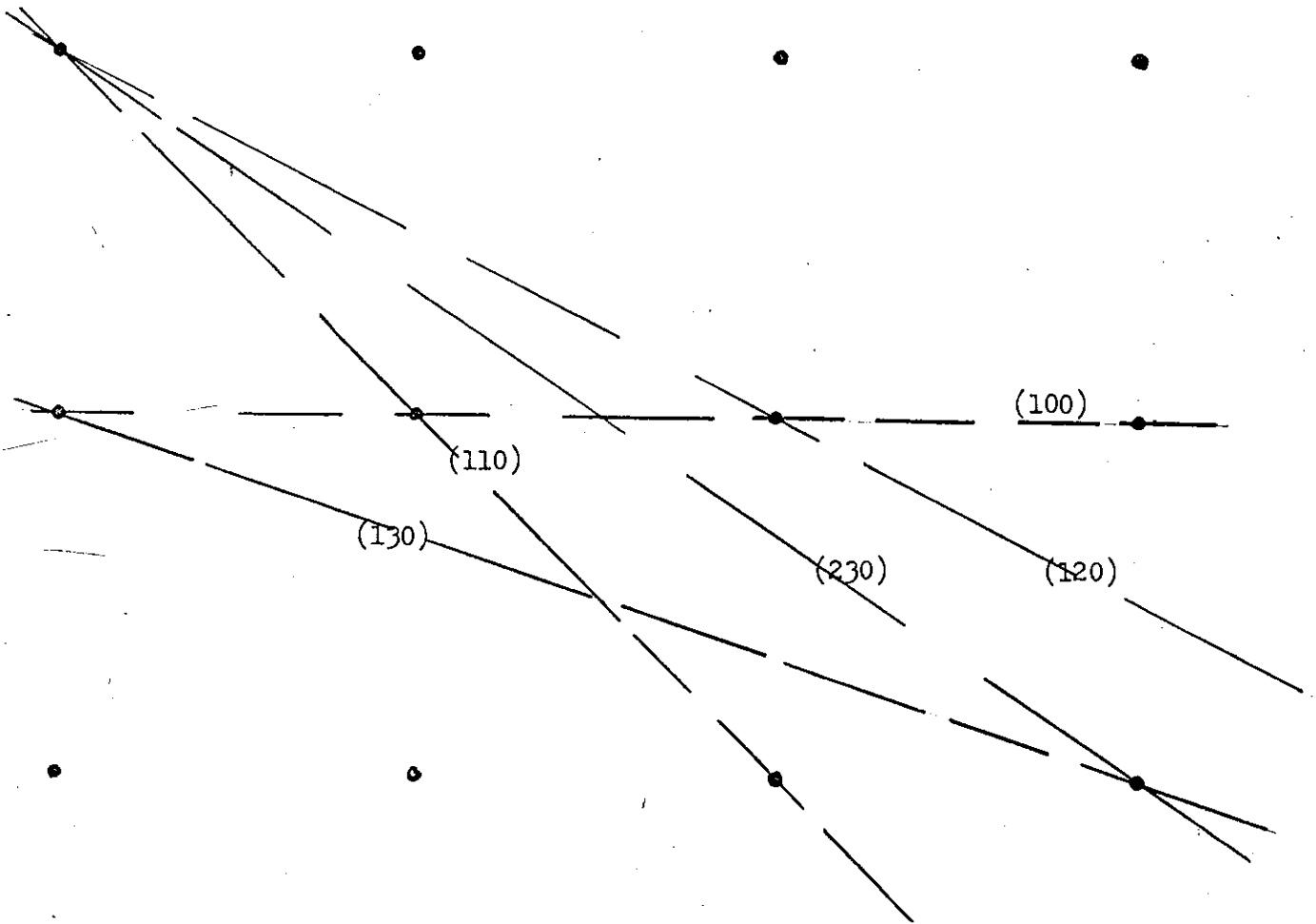


Fig. 5.2

- e- Rotar los brazos hasta que el índice I' apunte  $0^\circ$  y el índice I'' apunte  $180^\circ$ ;
- f- Controlar niveles y direcciones.

Para colocar el macrocristal en las posiciones (110), (120), (130), (230) se opera de la misma manera que para la posición (100), escogiendo el plano vertical conveniente, como se indica en la figura 5.2.

Para el macrocristal con esferas de 1.2 cm a 5 cm de distancia una de otra se escojen los planos según la figura 5.3.

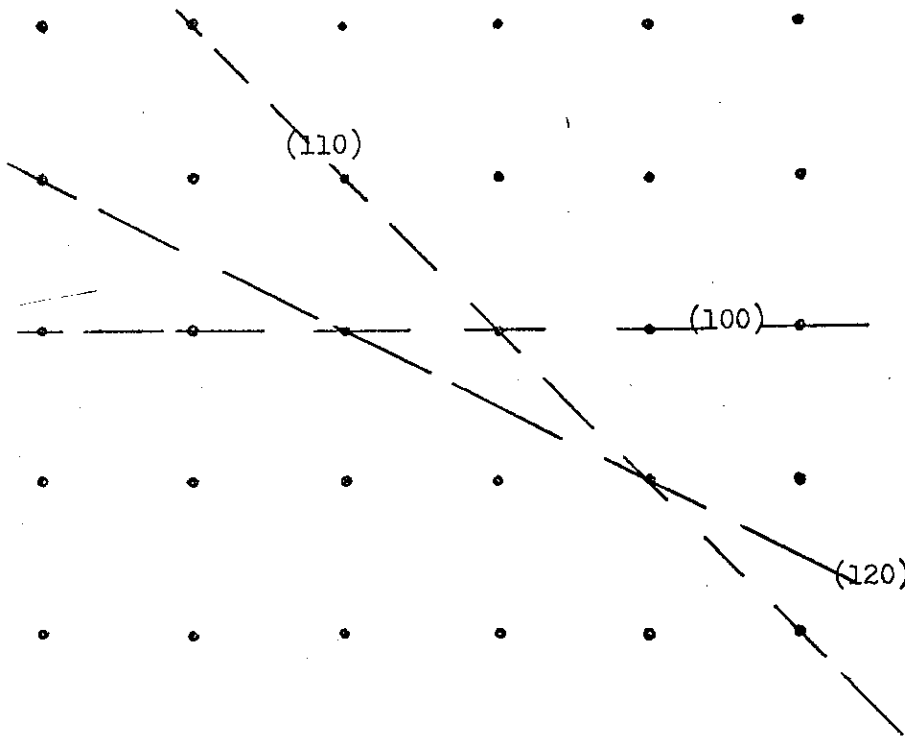


Fig. 5.3

Para el macrocristal con esferas de 2.33 cm de diámetro separadas horizontalmente entre sí  $7 \pm .05$  cm (macrocristal que llamaremos en adelante  $M_1$ ), las distancias entre los planos que admiten reflexión son dadas en la tabla 5.1.

Tabla 5.1  
Distancia entre los planos en  $M_1$

Posición	Fórmula	Distancia(cm)
(100)	$a$	$7.00 \pm .05$
(110)	$a/(1^2 + 1^2)^{\frac{1}{2}}$	$4.95 \pm .05$
(120)	$a/(1^2 + 2^2)^{\frac{1}{2}}$	$3.13 \pm .05$
(130)	$a/(1^2 + 3^2)^{\frac{1}{2}}$	$2.21 \pm .05$
(230)	$a/(2^2 + 3^2)^{\frac{1}{2}}$	$1.94 \pm .05$

En el macrocristal con esferas de 1.2 cm de diámetro separadas entre sí  $5 \pm .05$  cm (macrocristal que llamaremos en adelante  $M_2$ ) las distancias entre los planos que admiten reflexión están dadas en la tabla 5.2

Tabla 5.2  
Distancia entre los planos en  $M_2$

Posición	Fórmula	Distancia (cm)
(100)	$a$	$5.00 \pm .05$
(110)	$a/(1^2 + 1^2)^{\frac{1}{2}}$	$3.53 \pm .05$
(120)	$a/(1^2 + 2^2)^{\frac{1}{2}}$	$2.24 \pm .05$

Para hallar el valor teórico de los ángulos  $\theta$  para los cuales hay reflexión total usamos la fórmula (2.2)

$$\text{sen } \theta = n \lambda / 2 d_{hkl}$$

Debido a que tanto  $\lambda$  como  $d_{hkl}$  tienen un margen de error, debemos hallar el error que resulta al dividirlos entre sí. Para esto usamos la fórmula

$$\sigma_x^2 = x^2 \left( \frac{\sigma_\lambda^2}{\lambda^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} \right) \quad (5.1)$$

en donde

$\sigma_x$  es la desviación standard del resultado de la división;  
 $\sigma_\lambda$  es la desviación standard de la longitud de onda (.01 cm);  
 $\sigma_d$  es la desviación standard de la distancia  $d_{hkl}$  (.05 cm);  
 $x$  es el valor del seno del ángulo  $\theta$ , o sea el resultado de efectuar la división  $n \lambda / 2 d_{hkl}$  sin tomar en cuenta el margen de error.

El valor de  $\sigma_x$  para cada ángulo se da en la tabla 5.3.

Tabla 5.3

Valor de  $\sigma_x$  para cada ángulo de reflexión

M	(hkl)	n	$z^2$	$\sigma_{\lambda/\lambda}^2$	$\sigma_{d/d}^2$	$\sigma_x^2$	$\sigma_x$
$M_1$	(100)	1	.0586	.0000087	.000051	.0000035	.0019
		2	.2345	.0000087	.000051	.0000140	.0037
		3	.5277	.0000087	.000051	.0000315	.0056
		4	.9380	.0000087	.000051	.0000560	.0075
	(110)	1	.1172	.0000087	.000102	.0000130	.0036
		2	.4689	.0000087	.000102	.0000519	.0072
	(120)	1	.2932	.0000087	.000255	.0000773	.0088
	(130)	1	.5883	.0000087	.000512	.0003063	.0175
	(230)	1	.7633	.0000087	.000664	.0005135	.0223
	$M_2$	(100)	1	.1149	.0000087	.000100	.0000125
2			.4597	.0000087	.000100	.0000500	.0071
(110)		1	.2299	.0000087	.000201	.0000482	.0069
		2	.9197	.0000087	.000201	.0001028	.0139
(120)		1	.5752	.0000087	.000498	.0002914	.0170

Estos datos nos permiten ahora sacar las tablas 5.4 y 5.5 de los ángulos teóricos de reflexión, incluyendo el margen de error.

Tabla 5.4  
 Angulos teóricos de reflexión para  $M_1$

(hkl)	$d_{hkl}$	n	$n\lambda/2d_{hkl}$	sen $\theta$	$\theta$
(100)	$7.00 \pm .05$	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(7.00 \pm .05)}$	$.2421 \pm .0019$	$14^\circ 01' \pm 0^\circ 06'$
		2	$\frac{2(3.39 \pm .01)}{2(7.00 \pm .05)}$	$.4843 \pm .0037$	$28^\circ 58' \pm 0^\circ 15'$
		3	$\frac{3(3.39 \pm .01)}{2(7.00 \pm .05)}$	$.7264 \pm .0056$	$46^\circ 35' \pm 0^\circ 28'$
		4	$\frac{4(3.39 \pm .01)}{2(7.00 \pm .05)}$	$.9685 \pm .0075$	$75^\circ 36' \pm 1^\circ 49'$
(110)	$4.95 \pm .05$	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(4.95 \pm .05)}$	$.3424 \pm .0036$	$20^\circ 01' \pm 0^\circ 14'$
		2	$\frac{2(3.39 \pm .01)}{2(4.95 \pm .05)}$	$.6848 \pm .0072$	$43^\circ 13' \pm 0^\circ 34'$
(120)	$3.13 \pm .05$	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(3.13 \pm .05)}$	$.5415 \pm .0088$	$32^\circ 47' \pm 0^\circ 36'$
(130)	$2.21 \pm .05$	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(2.21 \pm .05)}$	$.7670 \pm .0175$	$50^\circ 05' \pm 1^\circ 35'$
(230)	$1.94 \pm .05$	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(1.94 \pm .05)}$	$.8737 \pm .0213$	$60^\circ 54' \pm 2^\circ 44'$

En la página siguiente aparece la tabla para los ángulos teóricos de reflexión correspondiente a  $M_2$ .

Tabla 5.5  
 Angulos teóricos de reflexión para  $M_2$

(hkl)	$d_{hkl}$	n	$n\lambda/2d_{hkl}$	sen $\theta$	$\theta$
(100)	5.00±.05	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(5.00 \pm .05)}$	.3390±.0035	19°49'±0°13'
		2	$\frac{2(3.39 \pm .01)}{2(5.00 \pm .05)}$	.6780±.0071	42°41'±0°34'
(110)	3.53±.05	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(3.53 \pm .05)}$	.4795±.0069	28°39'±0°27'
		2	$\frac{2(3.39 \pm .01)}{2(3.53 \pm .05)}$	.9590±.0139	73°32'±3°05'
(120)	2.24±.05	1	$\frac{3.39 \pm .01}{2(2.24 \pm .05)}$	.7584±.0170	49°19'±1°31'

## VI. REALIZACION DEL EXPERIMENTO

### A. Medición de la amplitud de la microonda sin macrocristal.

Para medir la amplitud de la microonda, se fija el emisor y el receptor en sus respectivos soportes, colocando los brazos de tal manera que queden paralelos a la recta  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , siendo en nuestro caso la distancia entre emisor y eje de giro 97 cm y entre receptor y eje de giro 100 cm.

Se enciende el osciloscopio dando vuelta al botón 1 (fig. 9) casi hasta el máximo; a los botones 2 (enfoco), 4 (posición horizontal) y 7 (ancho horizontal de la raya) hasta la mitad; el botón 8 se deja en posición 10X y el 6 en posición 60, mientras los demás botones quedan en el mínimo.

Se enciende luego la fuente de potencia por medio del interruptor A (fig. 7), estando la palanquita M bajada y los botones C y D en el mínimo. Al aparecer en la pantalla del osciloscopio una raya luminosa se sube la palanca del interruptor M de la fuente de potencia, se baja la palanca D hacia la derecha y se da vuelta al botón B hasta que la aguja del voltímetro V marque 390 voltios en la numeración roja. Se da vuelta entonces a la palanca D hacia la izquierda y se da vuelta al botón C hasta que el voltímetro marque 100 voltios en la numeración negra.

Aparece en la pantalla del osciloscopio un conjunto de tres ondas de amplitud decreciente. Se centra la posición y el tamaño de la mayor por medio de los botones 3 (posición vertical), 4 (posición horizontal), 5 (regulador de amplitud), 6 (en este experimento pasa a la posición 100-1000), 7 (an-

cho horizontal de la raya), 9 (vernier de frecuencia, que en este caso queda en 30).

En el curso del experimento se utilizan los botones 3 y 4 para colocar la onda en posición cómoda para la lectura exacta de la amplitud, y el botón 6 queda en 10X mientras la amplitud sea superior a las 40 unidades, y pasa a 1X cuando la amplitud es menor de las 40 unidades.

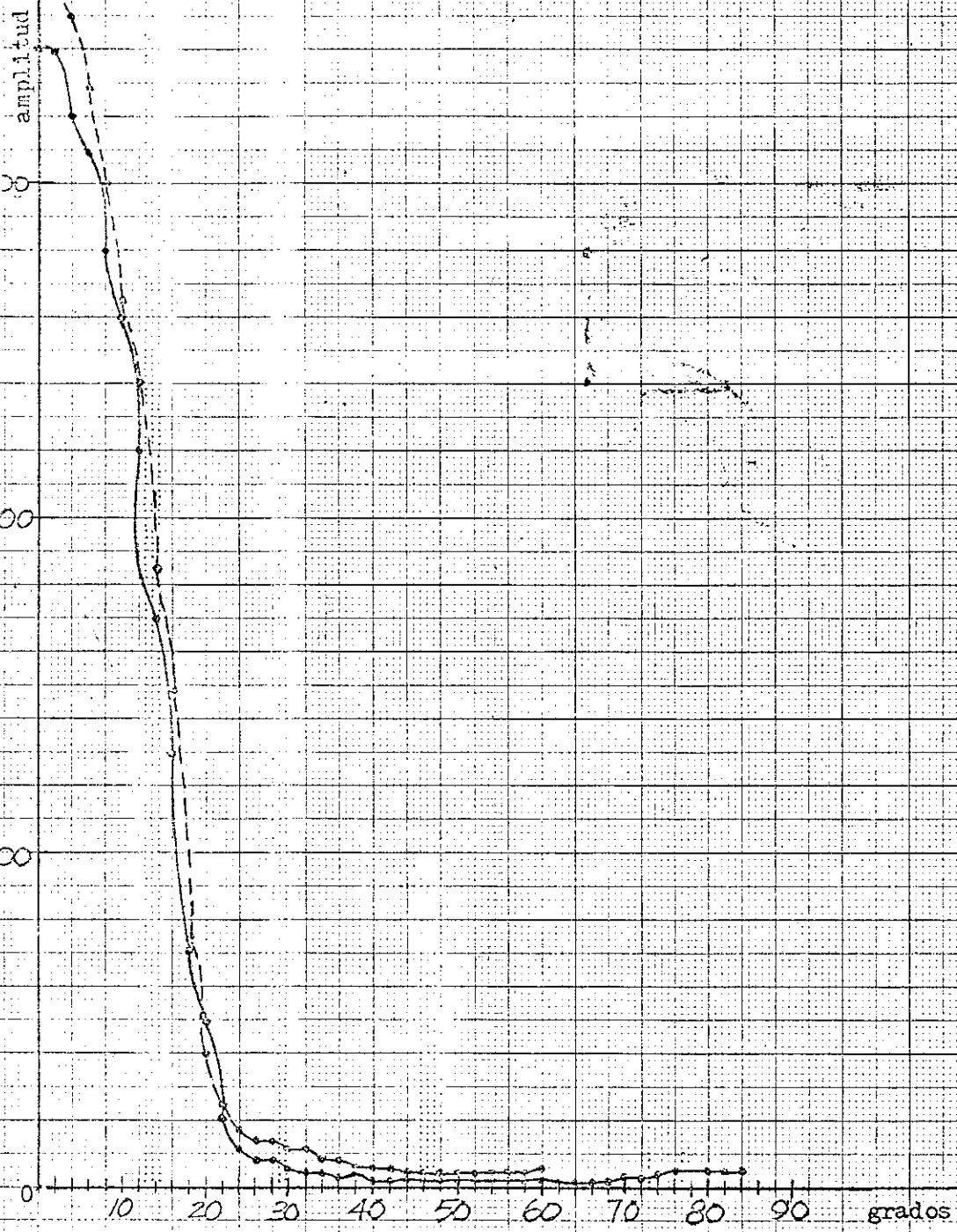
Cabe notar que el cambio a 10X no corresponde exactamente a múltiplos de 10, sino aproximadamente de 12, pero este hecho no afecta los resultados del experimento y ha sido ignorado, multiplicándose los resultados por 10 cuando haya sido necesario.

Centrada la onda en la pantalla, se anotó su amplitud; después se corrieron los brazos móviles en  $2^\circ$  cada uno, de manera que el ángulo entre ellos disminuyera de  $4^\circ$ , y se apuntó el nuevo valor de la amplitud de la onda. Corriendo gradualmente los brazos de  $2^\circ$  en  $2^\circ$ , se anotó vez por vez el resultado observado y se consiguieron así los valores de la influencia directa del emisor sobre el receptor en sus diferentes posiciones, no estando presente el macrocristal.

Los datos numéricos obtenidos están en el apéndice A y la gráfica correspondiente es la 6.1.

En las mismas páginas aparecen también los valores numéricos y la gráfica de otra observación similar hecha con el emisor a 40 cm del eje y el receptor a 51 cm.

Los altos valores de la amplitud de la onda hasta los  $20^\circ$  dan razón de los resultados obtenidos estando presente el macrocristal, pues hay interferencia entre las ondas reflejadas por el macrocristal y las que llegan directamente



Difracción de las microondas en susencia del macrocristal *en dos observaciones*  
Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 100 cm.

Gráfica 6.1

al receptor desde el emisor.

B. Medida de la amplitud de la microonda con el macrocristal  $M_1$  interpuesto.

1. Posición (100). A continuación se colocó el macrocristal  $M_1$  sobre la mesa T en la posición (100), es decir, tal que el plano vertical (100) fuera paralelo a  $0^\circ$ - $180^\circ$ .

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 100 cm.

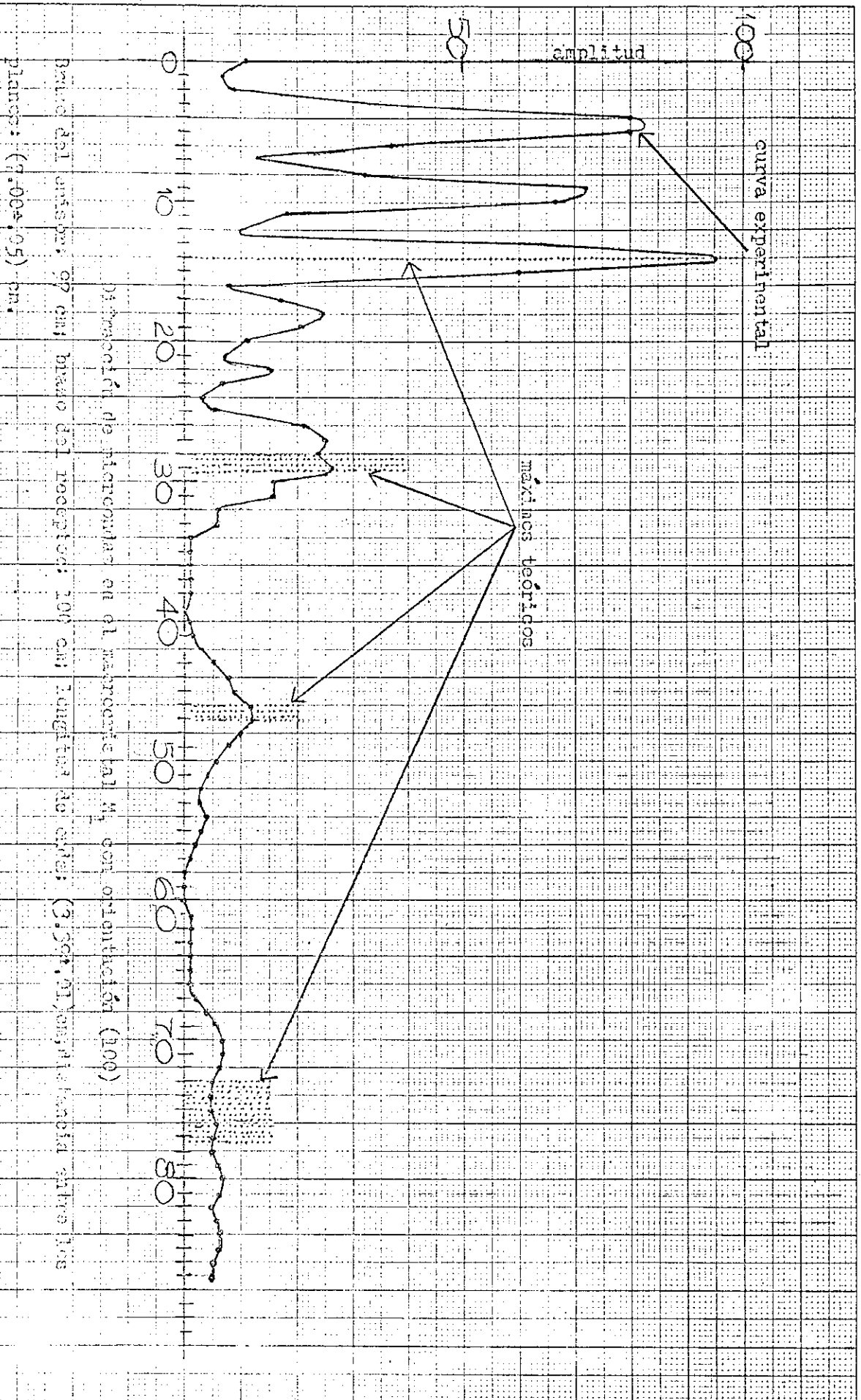
Distancia entre los planos del macrocristal:  $7.00 \pm 0.05$  cm.

Tabla 6.1  
Ángulos teóricos y experimentales

$\theta$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
Teór.	$14^\circ 01' \pm 06'$	$28^\circ 58' \pm 15'$	$46^\circ 35' \pm 28'$	$75^\circ 36' \pm 1^\circ 49'$
A	$14^\circ 00'$	$28^\circ 30'$	$46^\circ 30'$	indefinido
A'	$14^\circ 00'$	$29^\circ 00'$	$47^\circ 00'$	$81^\circ 00'$
A''	$14^\circ 00'$	$28^\circ 00'$	$46^\circ 00'$	$71^\circ 00'$
B	$13^\circ 45'$	$29^\circ 00'$	$46^\circ 30'$	$76^\circ 00'$
B'	$13^\circ 45'$	$29^\circ 00'$	$45^\circ 30'$	$75^\circ 45'$
B''	$13^\circ 45'$	$28^\circ 45'$	$46^\circ 15'$	$76^\circ 15'$

En la tabla anterior, la primera columna de la izquierda indica cómo han sido obtenidos los ángulos y las demás columnas se refieren a los diferentes órdenes de reflexión.

En el primer renglón están los valores teóricos de los ángulos, cómo previstos por la ley de Bragg.



Diferencia de fase en el microscopio M<sub>1</sub> con orientación (100)

Distancia del antipolo: 97 cm; brazo del receptor: 100 cm; longitud de onda: (3,294 Å); amplitud de onda incidente: (7,004 · 10<sup>-5</sup>) cm.

Gráfica 6.2

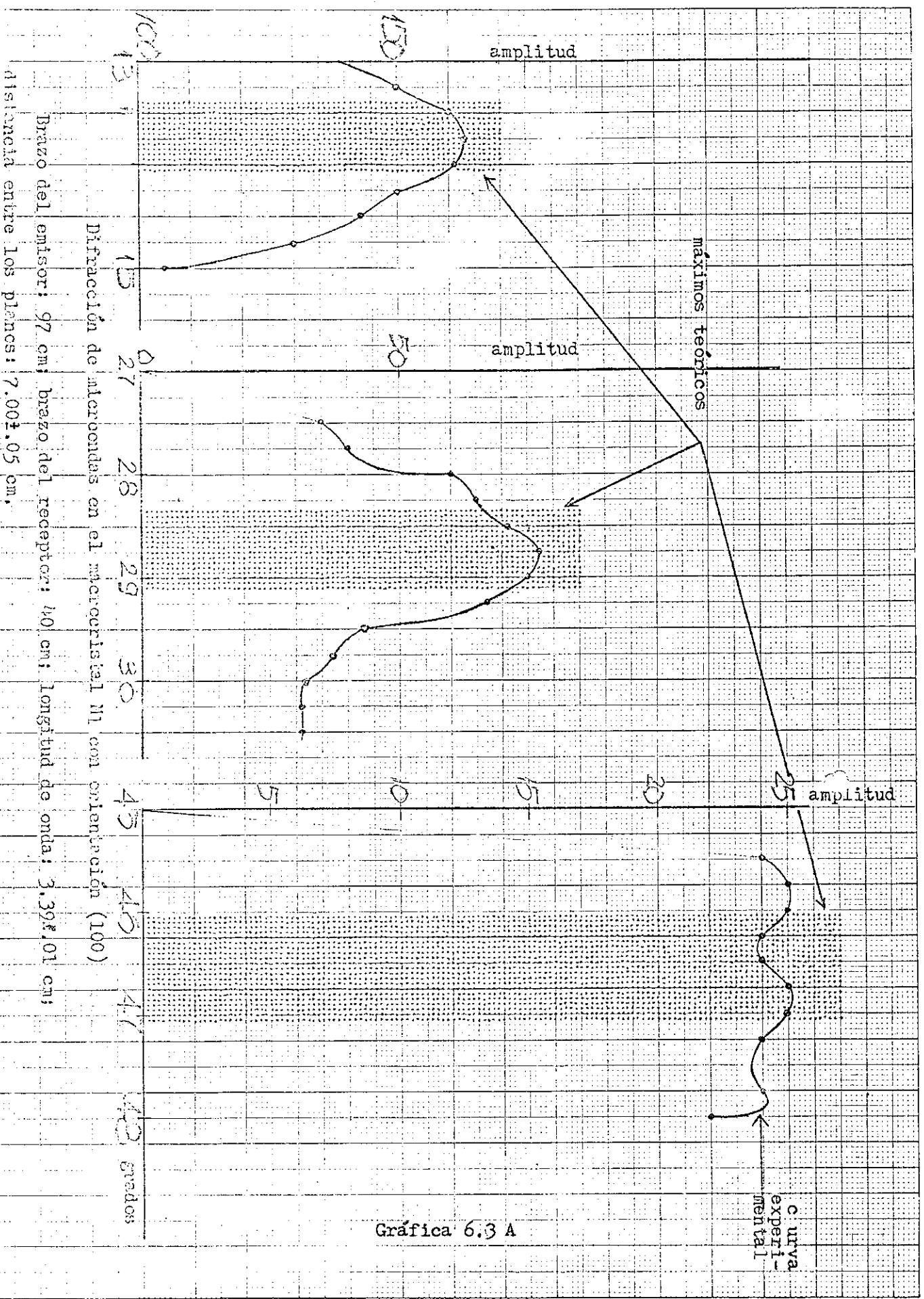
En los renglones A están los máximos experimentales obtenidos variando el ángulo de incidencia de la microonda desde  $0^\circ$  hasta  $87^\circ$ , grado por grado, con esta aclaración : en A están directamente los valores máximos obtenidos en el experimento; en A' y A'' están los máximos obtenidos introduciendo los datos experimentales a la computadora y pidiéndole que los resuelva en un polinomio de segundo y cuarto grado respectivamente.

En los renglones B están los máximos experimentales obtenidos variando el ángulo de incidencia de la microonda de  $15'$  en  $15'$  en las vecindades de los máximos previstos teóricamente y siempre con la aclaración de que en B están los máximos experimentales directos, mientras en B' y B'' están los máximos elaborados por la computadora en base a los datos experimentales, en curvas de segundo y cuarto grado.

Las observaciones se desarrollaron de la siguiente manera:

Estando el emisor y el receptor de microondas diagonalmente opuestos, es decir, apuntando  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente, y el macrocristal  $M_1$  en la posición indicada anteriormente, el valor de la amplitud leído en la pantalla del osciloscopio fue de 11 divisiones. Apuntado este valor, se corrió de un grado tanto el brazo del emisor como el del receptor, quedando el primero con el índice en  $1^\circ$  y el segundo en  $179^\circ$ . Después de apuntar el nuevo valor de la amplitud (7 divisiones), se volvió a correr emisor y receptor de manera que apuntaran  $2^\circ$  y  $178^\circ$  respectivamente, y la amplitud leída en la pantalla del osciloscopio fue de 9 divisiones.

Continuando así el corrimiento de emisor y receptor grado por grado, apuntando cada vez el valor de la amplitud, se



Gráfica 6.3 A

Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 40 cm; longitud de onda: 3.398,01 cm; distancia entre los planos: 7.001,05 cm.

llegó hasta que el índice del emisor estaba en  $87^\circ$  y el del receptor en  $93^\circ$ .

Los valores numéricos están en el apéndice B y la gráfica correspondiente es la 6-2.

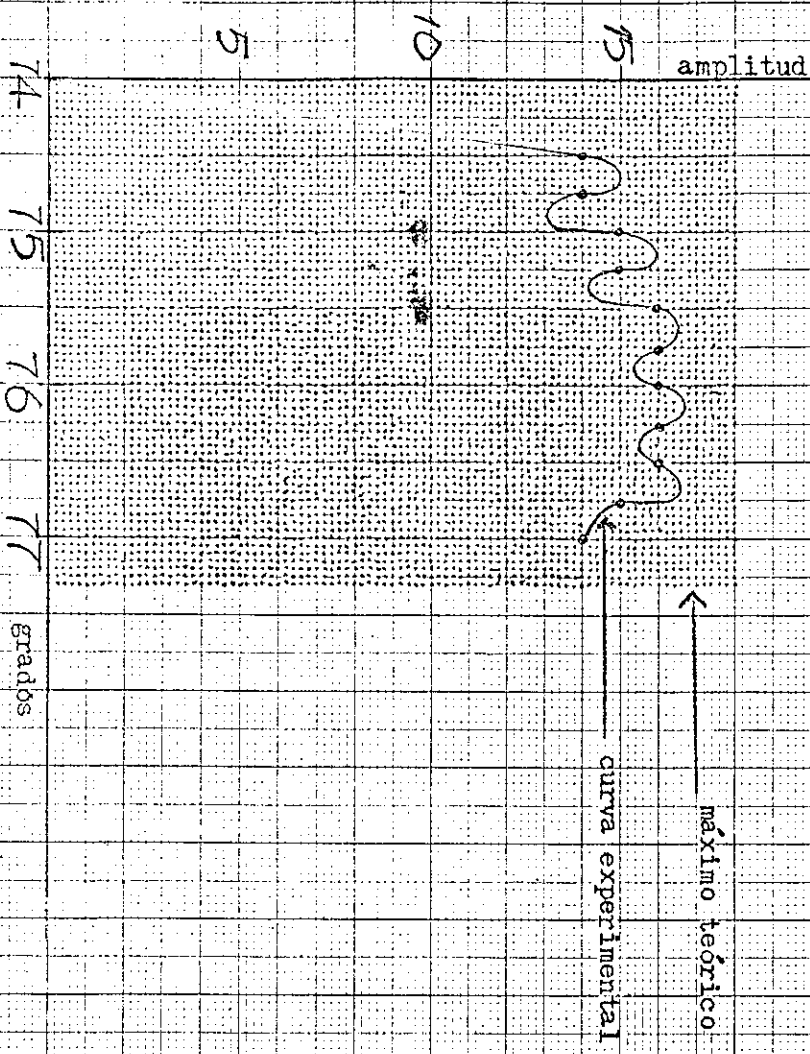
Teóricamente se prevén cuatro máximos: alrededor de los  $14^\circ$ ,  $29^\circ$ ,  $47^\circ$  y  $76^\circ$ . Para el último de dichos ángulos el margen de posible error abarca casi cuatro grados, exactamente  $1^\circ 51'$  a cada lado del valor teórico del ángulo ( $76^\circ 36'$  si no se diera margen de error en las medidas). Experimentalmente, el máximo correspondiente a  $n = 4$  se mantendrá fluctuando desde los  $70^\circ$  en adelante.

Los demás máximos, correspondientes a  $n = 1, 2, 3$  se mantienen en una coincidencia satisfactoria entre los valores experimentales y los teóricos.

Nótese los máximos a los  $5^\circ$ ,  $9^\circ$ ,  $18^\circ$  y  $22^\circ$ , debidos a la interferencia de las ondas reflejadas por el macrocristal y las que llegan directamente del emisor al receptor.

La gráfica 6.3 (cuyos valores numéricos aparecen en el apéndice C) se refieren a otras mediciones, hechas después de haber modificado algo la mesa giratoria a fin de conseguir una mayor precisión. Y así fue posible obtener datos de  $15'$  en  $15'$ . Para estas observaciones, el emisor estaba a 97 cm del eje y el receptor a 40 cm. El ángulo de incidencia varió entre pequeños valores alrededor de los diferentes máximos teóricos, es decir, entre  $13^\circ$  y  $15^\circ$ , entre  $27^\circ 30'$  y  $30^\circ 30'$ , entre  $45^\circ 30'$  y  $48^\circ$ , entre  $74^\circ 30'$  y  $77^\circ$ . Los máximos experimentales se mantienen dentro de los límites de los máximos teóricos, con excepción del primero que presenta un adelanto de  $3'$ . El tercero presenta cierta irregularidad que lo vuelve más bien indefinido.

Difracción de neutrones en el microcristal  $M_1$  con orientación (100)  
Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 40 cm; longitud de onda: 3.39 Å; 0.1 cm;  
distancia entre los planos: 7.00 Å; 0.05 cm.



Gráfica 6.3 B

2. Posición (110). Se reorientó el macrocristal  $M_1$  de tal manera que el plano vertical (110) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 50 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 50 cm.

Distancia entre los planos de reflexión:  $4.95 \pm 0.05$  cm.

Tabla 6.2  
Ángulos teóricos y experimentales

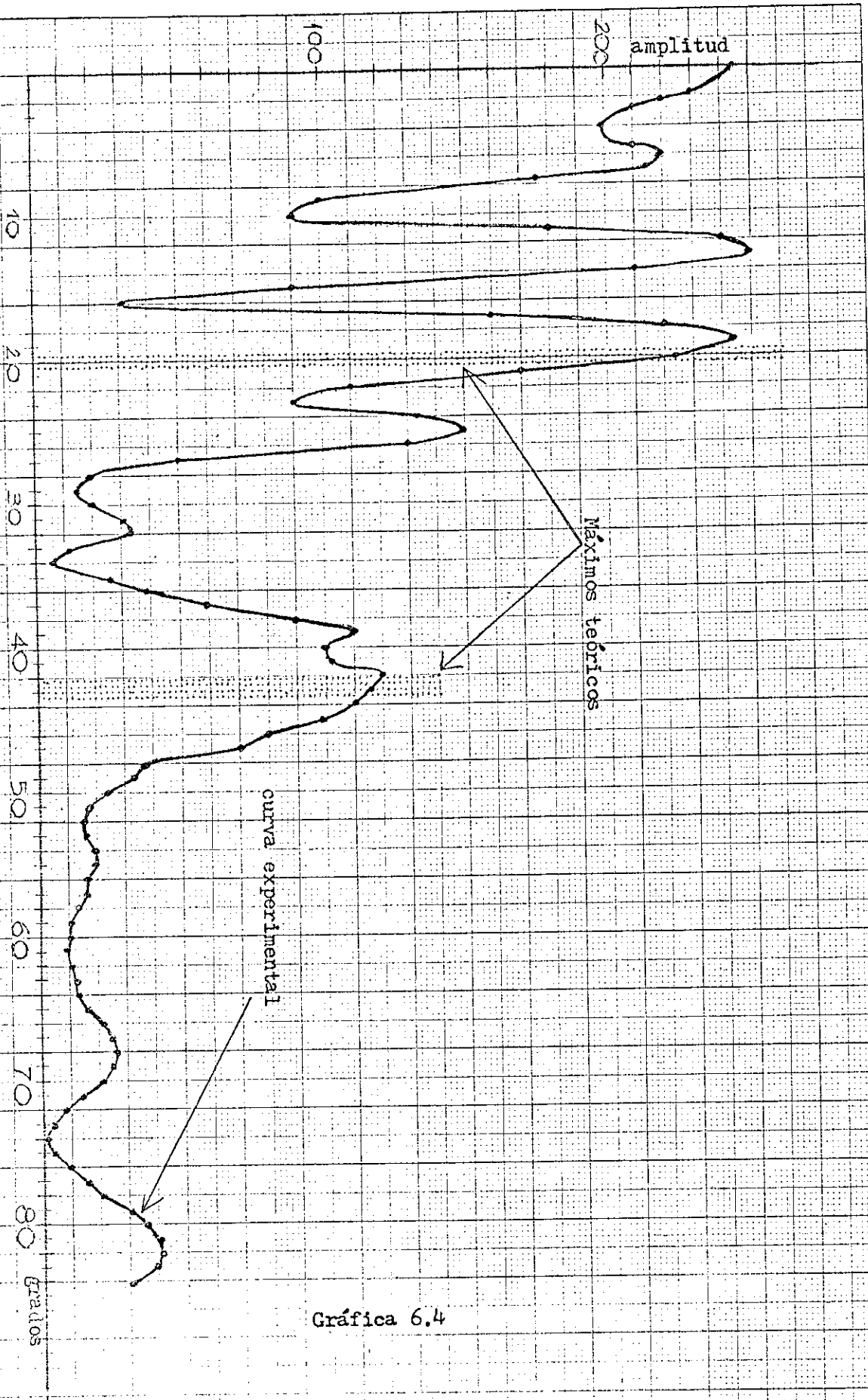
$\theta$	$n = 1$	$n = 2$
Teór.	$20^\circ 01' \pm 14'$	$43^\circ 13' \pm 34'$
A	$19^\circ 00'$	$42^\circ 00'$
A'	$20^\circ 00'$	$42^\circ 00'$
A''	$19^\circ 00'$	$42^\circ 00'$
B	$20^\circ 00'$	$43^\circ 45'$
B'	$20^\circ 00'$	$43^\circ 45'$
B''	$20^\circ 00'$	$43^\circ 45'$

Las especificaciones coinciden con las de la tabla 6.1, exceptuando los valores de los ángulos.

Para los valores de los renglones A, el ángulo de incidencia de las microondas con el plano vertical (110) varió desde  $0^\circ$  hasta  $84^\circ$ , rotando los brazos grado por grado.

Los datos numéricos aparecen en el apéndice B y la gráfica correspondiente es la 6.4.

También en este caso aparecen unos máximos no previstos en  $6^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $35^\circ$  y  $82^\circ$ . Los primeros tres son debidos a la inter-



Brazo del emisor: 50 cm; brazo del receptor: 50 cm; longitud de onda: 3.397.01 cm; distancia entre los planos: 4.957.05 cm.

Gráfica 6.4

Gráfica 6.4

ferencia entre las microondas reflejadas y las directas; mientras el último debe atribuirse a otras causas:

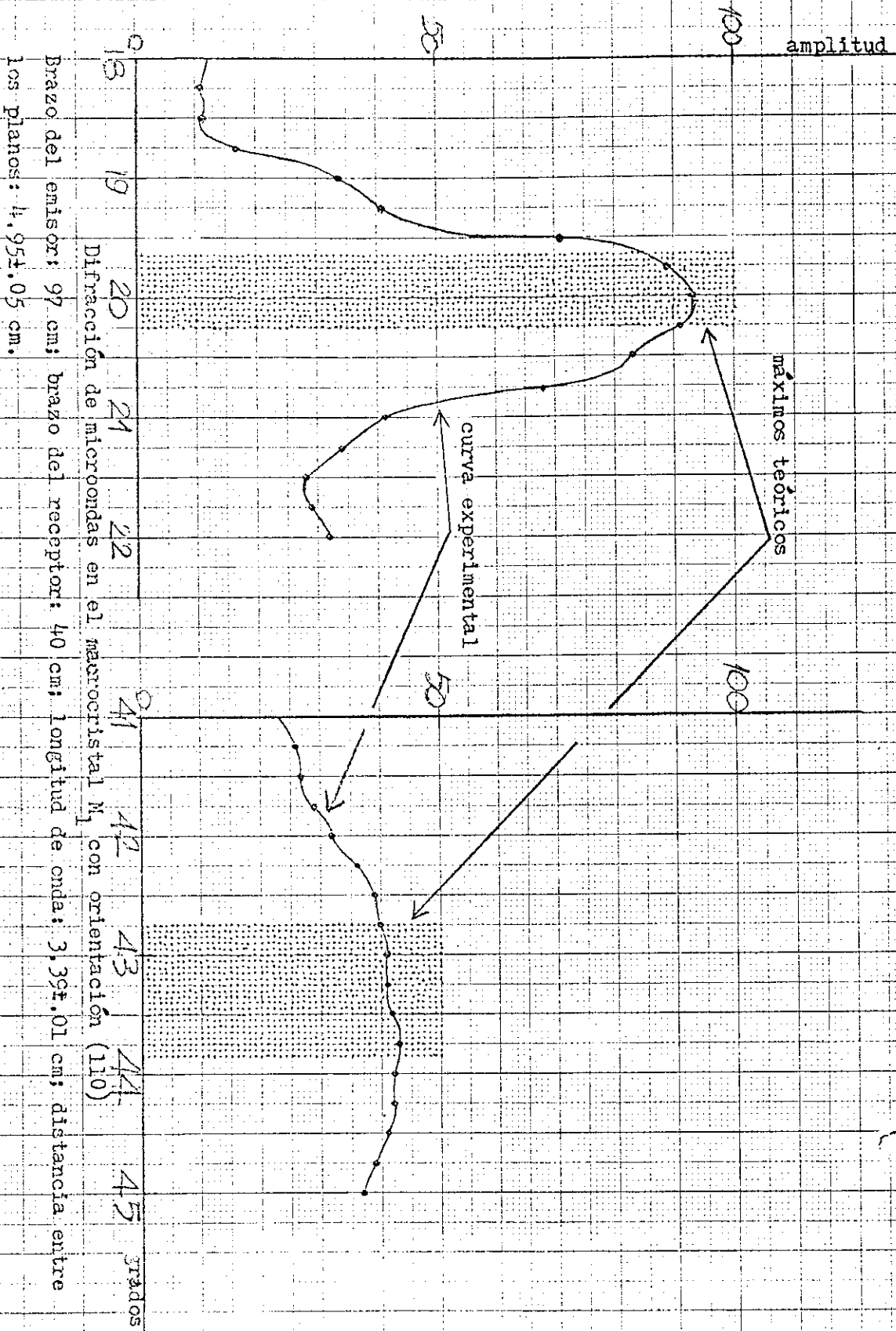
- a- El macrocristal no perfectamente alineado;
- b- Hacia el final del cuadrante la diferencia de fase entre las ondas reflejadas por los varios planos se hace cada vez más pequeña y se tiende a un nuevo máximo.

Los dos máximos esperados teóricamente aparecen en el experimento corridos alrededor de  $30'$ , lo cual confirmaría la suposición de que el macrocristal estuviese ligeramente corrido con respecto a la posición (110).

Los valores de los renglones B de la tabla 6.2 se refieren a observaciones más detalladas: el emisor estaba a 97 cm del eje y el receptor a 100 cm. El ángulo de incidencia varió entre  $18^\circ$  y  $22^\circ$  y entre  $41^\circ$  y  $45^\circ$  de  $15'$  en  $15'$ .

Los datos numéricos aparecen en el apéndice D y la gráfica correspondiente es la 6.5.

El primer máximo se mantiene dentro de los límites previstos; el segundo tiende a correrse hacia la derecha, pero el valor  $43^\circ 45'$  está todavía en consonancia con la teoría.



Gráfica 6.5

3. Posición (120). Se reorientó el macrocristal  $M_1$  de manera que el plano vertical (120) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

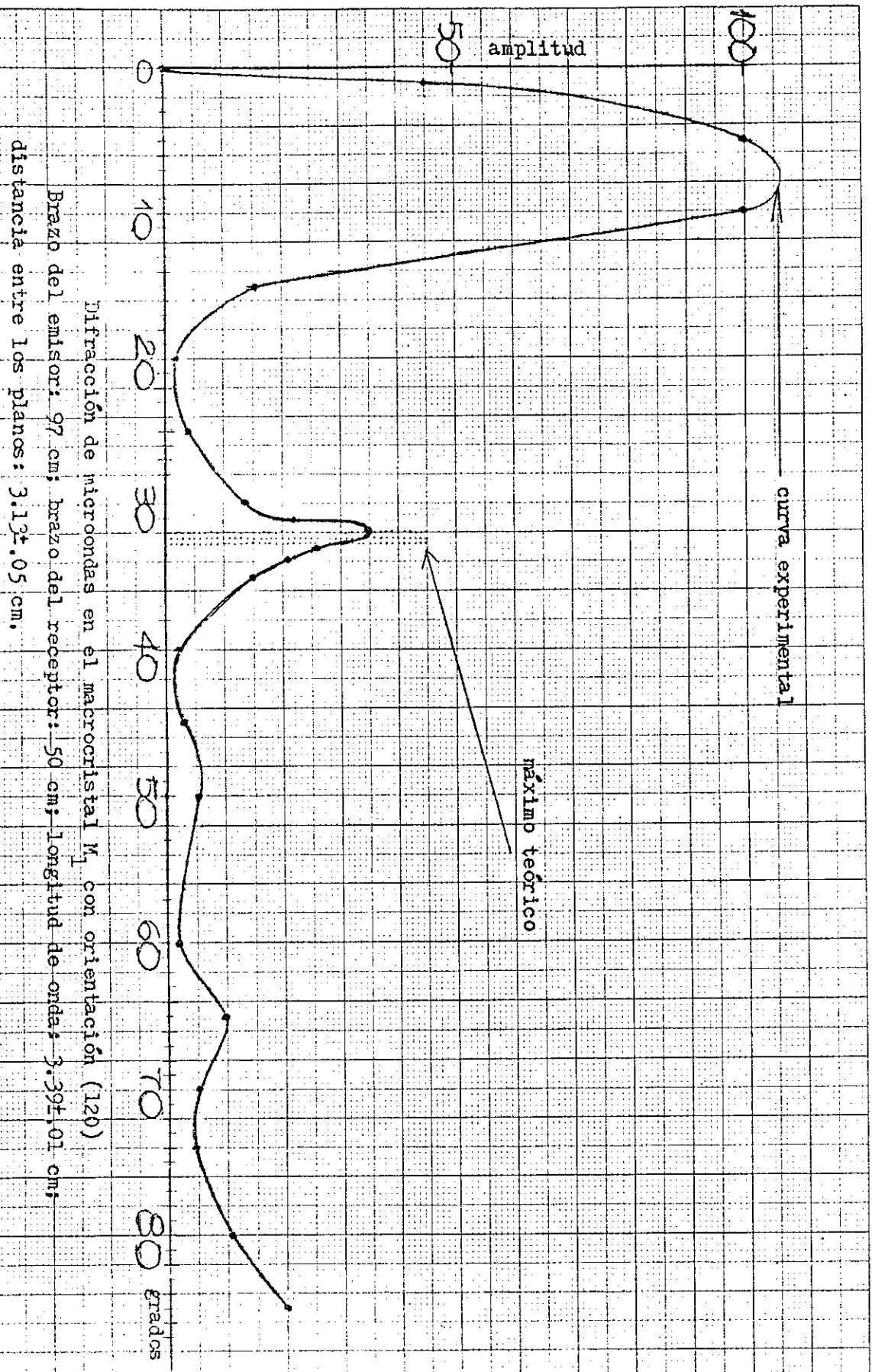
Distancia receptor-eje de giro: 40 cm.

Distancia entre los planos de reflexión:  $3.13 \pm 0.05$  cm.

Tabla 6.3  
Ángulos teóricos y experimentales

$\theta$	n=1
Teór.	$32^\circ 47' \pm 36'$
A	$32^\circ 00'$
A'	$33^\circ 00'$
A''	$31^\circ 45'$
B	$32^\circ 50'$
B'	$32^\circ 00'$
B''	$32^\circ 45'$

Para las observaciones cuyo máximo experimental corresponde al renglón A de la Tabla 6.1, el ángulo de incidencia de las microondas con el plano vertical (120) varió desde  $0^\circ$  a  $85^\circ$  de cinco en cinco grados, exceptuado entre  $30^\circ$  y  $35^\circ$ , en cuyo margen se hicieron observaciones de grado en grado, por ser vecindades del máximo teórico.



Gráfica 6.6

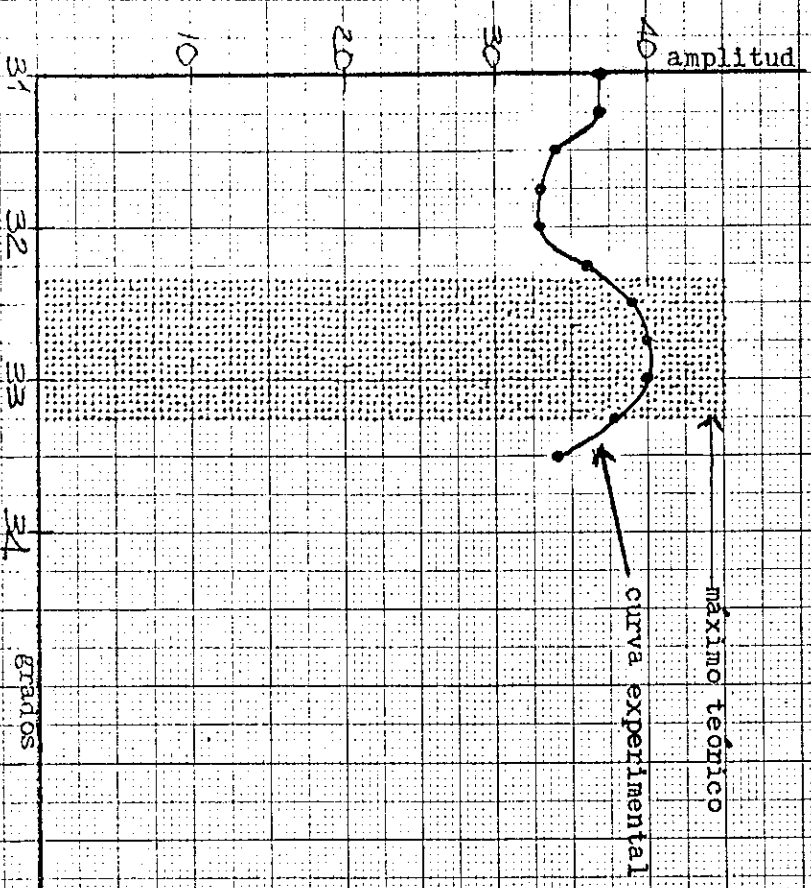
Los datos numéricos aparecen en el apéndice B y la gráfica correspondiente es la 6.6.

La primera parte de la curva refleja el hecho de que las observaciones se hicieron muy distanciadas entre sí ( $5^\circ$ ).

El máximo experimental a los  $32^\circ$  está ligeramente corrido ( $11'$ ) hacia la izquierda con respecto a lo que se esperaba teóricamente.

En el renglón B de la tabla 6.3 aparece el máximo experimental correspondiente a la gráfica 6.7, cuyos datos numéricos están en el apéndice D, y se refiera a unas observaciones hechas de  $15'$  en  $15'$  entre  $31^\circ$  y  $33^\circ 30'$ , estando el emisor a 97 cm y el receptor a 40 cm del eje de giro.

En este último caso el máximo experimental está dentro de los límites del máximo teórico.



Difracción de microondas en el microcristal  $M_1$  con orientación (120)

Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 40 cm; longitud de onda:  $3.394 \pm 0.01$  cm

distancia entre los planos:  $3.13 \pm 0.05$  cm.

Gráfica 6.7

4. Posición (130). Se reorientó el macrocristal  $M_1$  de tal manera que el plano vertical (130) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 50 cm.

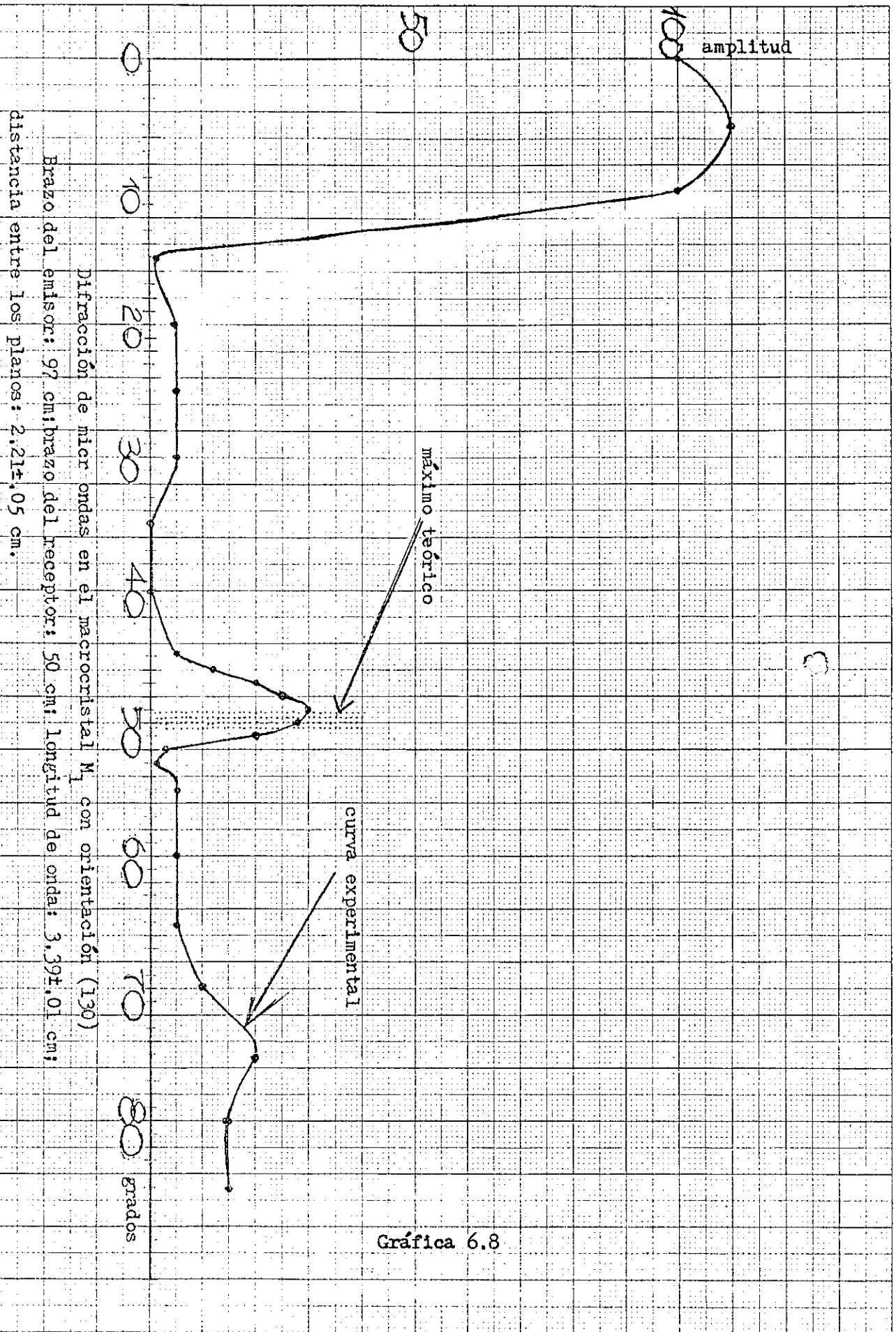
Distancia entre los planos de reflexión:  $2.21 \pm .05$  cm.

Tabla 6.4  
Ángulos teórico y experimental

$\theta$	$n = 1$
Teór.	$50^\circ 05' \pm 1^\circ 35'$
A	$49^\circ 00'$
A'	$49^\circ 00'$
A''	$49^\circ 00'$
B	$50^\circ 40'$
B'	$51^\circ 00'$
B''	$49^\circ 30'$

En el renglón A de la tabla 6.4 está el resultado obtenido variando el ángulo de incidencia de las microondas con el plano vertical (130) desde  $0^\circ$  hasta  $85^\circ$  de cinco grados en cinco grados, menos en las vecindades del máximo teórico, entre  $45^\circ$  y  $53^\circ$ , en que se varió el ángulo de grado en grado.

Los datos numéricos aparecen en el apéndice B y la grá-



Gráfica 6.8

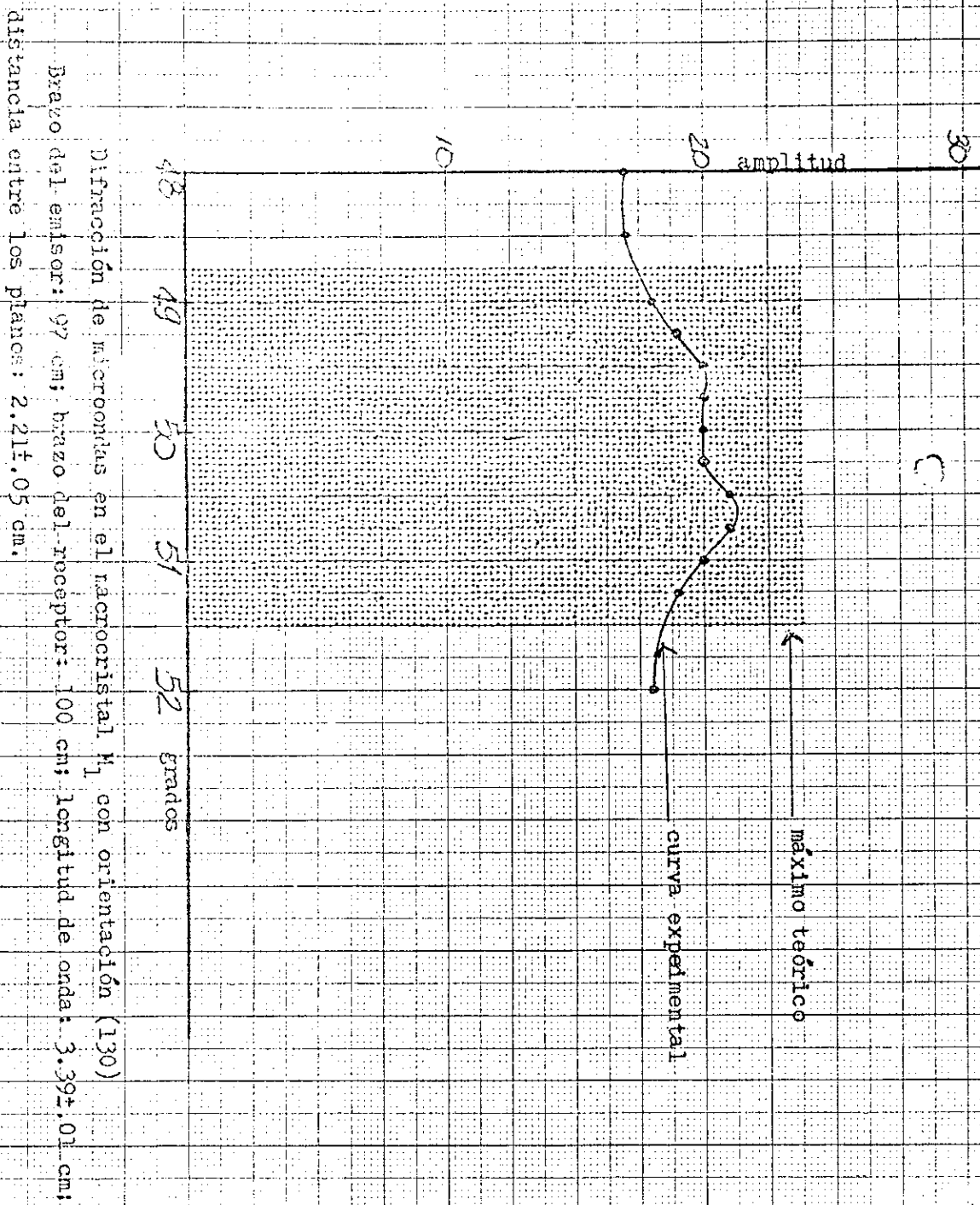
fica correspondiente es la 6.8.

El máximo experimental cae exactamente dentro de los límites previstos.

Después de los  $70^\circ$  se observa un nuevo aumento de la amplitud debido posiblemente a una imperfecta orientación del macrocristal, a la reflexión de las paredes del local y a una progresiva disminución de la diferencia de fase entre las microondas reflejadas por los varios planos verticales.

En el renglón B de la tabla 6.4 aparece el valor del máximo experimental correspondiente a la gráfica 6.9, cuyos datos numéricos están en el apéndice D, y se refiere a unas observaciones hechas de  $15'$  en  $15'$  entre  $48^\circ$  y  $52^\circ$ , siendo la longitud de los brazos del emisor y del receptor de 97 y 100 cm respectivamente.

Los resultados experimentales están de acuerdo con la teoría, pero el máximo experimental no es tan pronunciado, debido a la distancia del receptor.



Gráfica 6.9

5. Posición (230). Se reorientó el macrocristal  $M_1$  de manera que el plano vertical (230) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 47 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 50 cm.

Distancia entre los planos de reflexión:  $1.94 \pm 0.05$  cm.

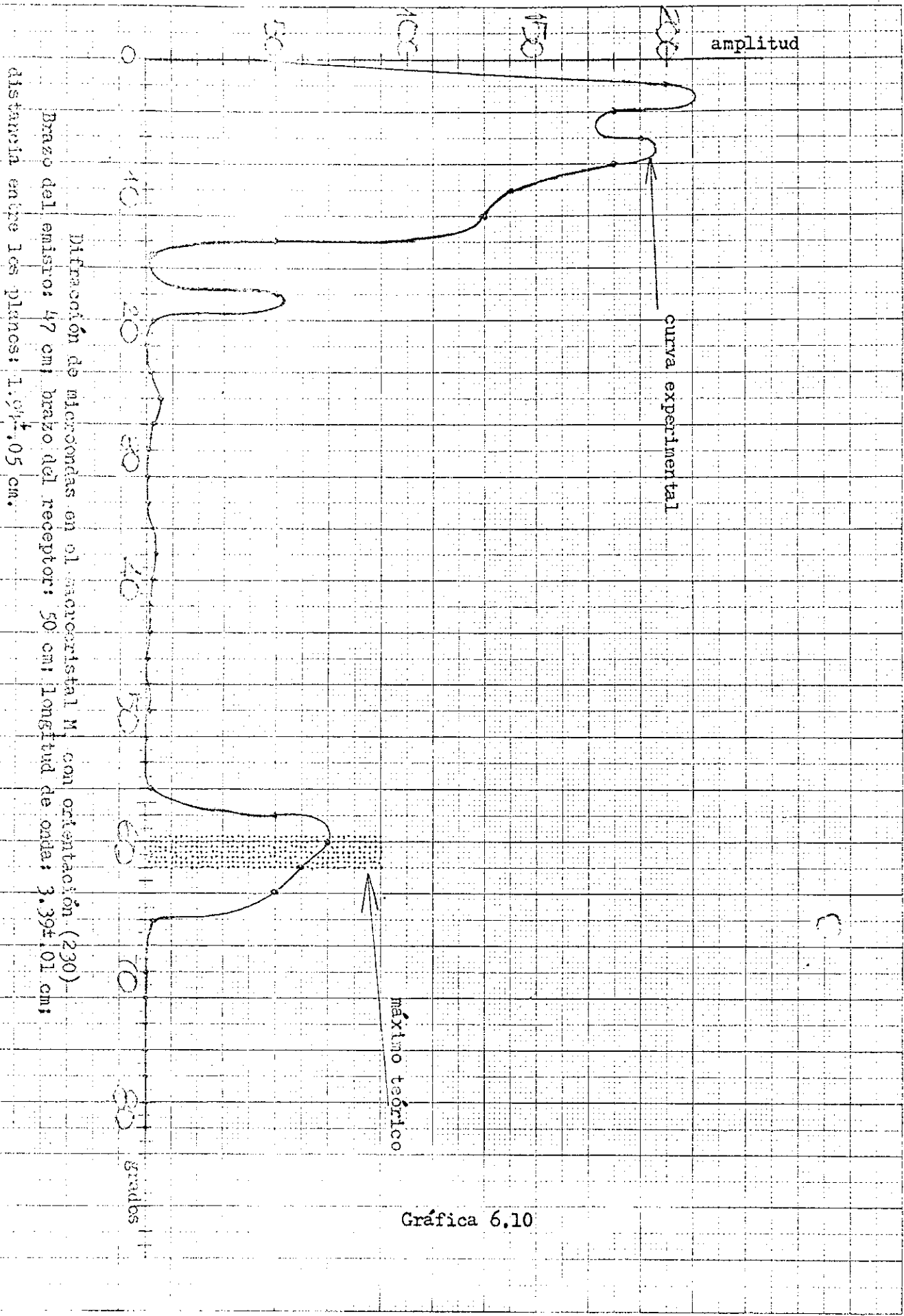
Tabla 6.5  
Angulos teóricos y experimentales

$\theta$	$n = 1$
Teór.	$60^\circ 54' \pm 2^\circ 44'$
A	$60^\circ 00'$
A'	$62^\circ 00'$
A''	$60^\circ 00'$
B	$60^\circ 30'$
B'	$60^\circ 00'$
B''	$60^\circ 25' - 61^\circ 00'$

El ángulo de incidencia de la microonda con el plano vertical (230) varió entre  $0^\circ$  y  $82^\circ$ , de dos grados en dos grados.

Los datos numéricos aparecen en el apéndice B y la gráfica correspondiente es la 6.10.

El valor del máximo experimental aparece en el renglón A.



Difracción de microondas en el monocristal  $M_1$  con orientación (230).  
Brazo del emisor: 47 cm; brazo del receptor: 50 cm; longitud de onda: 3.39±.01 cm;  
distancia entre los planos: 1.04±.05 cm.

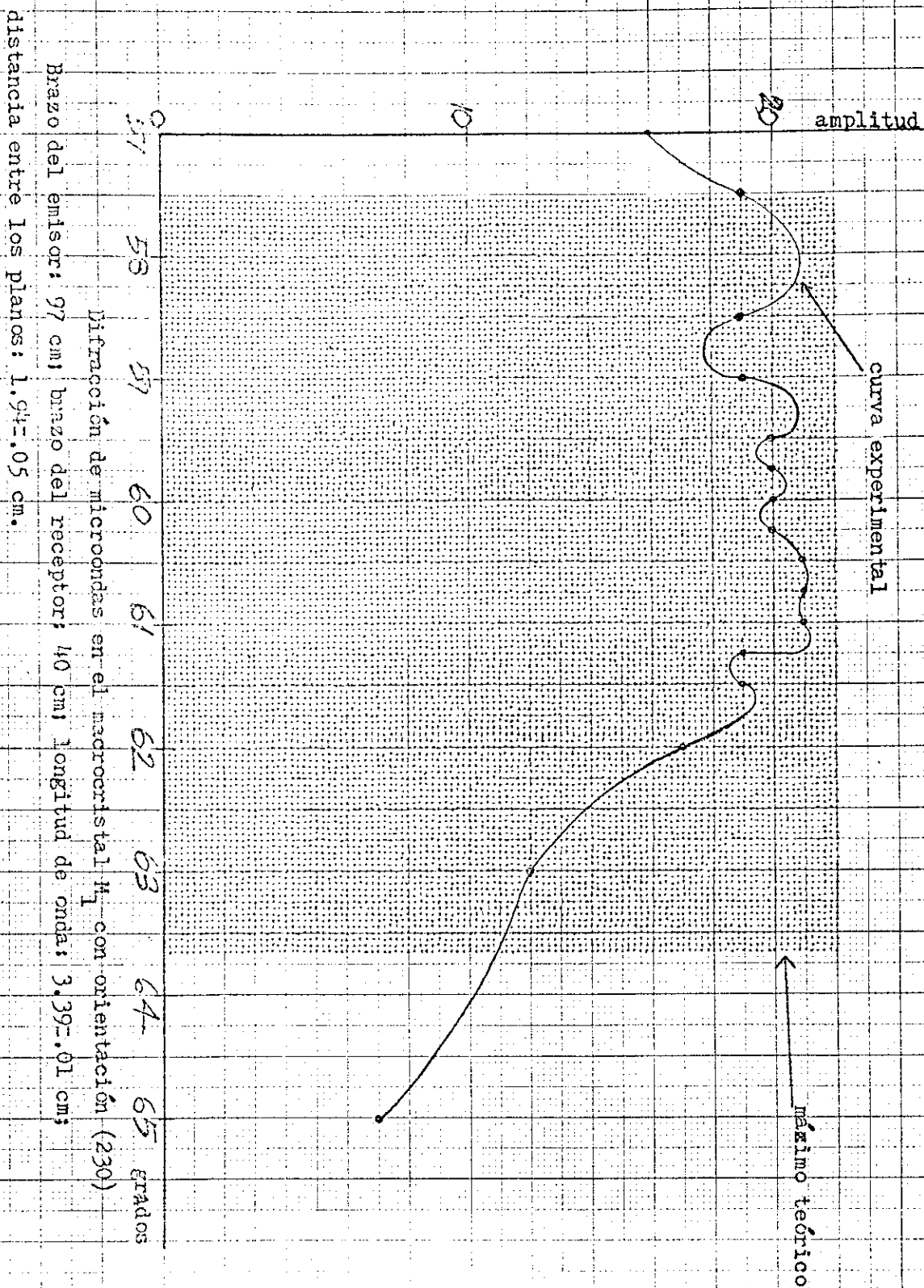
Gráfica 6.10

En el renglón B de la tabla 6.5 aparece el valor del máximo experimental correspondiente a la gráfica 6.11, cuyos datos numéricos están en el apéndice D, y se refiere a una observaciones hechas de 15' en 15' entre 57° y 64°, con el emisor a 97 cm y el receptor a 40 cm del eje de giro.

Hay concordancia entre la expectativa teórica y los resultados experimentales.

A pesar de que el margen de error para esta posición sea muy amplio, es interesante notar que el máximo experimental tanto de la gráfica 6.10 como de la 6.11 está dentro de un margen de solamente  $\pm 1^\circ$ .

Para el macrocristal  $M_1$ , la orientación (230) es la última que permita reflexión constructiva.



Gráfica 6.11

C. Medición de la amplitud de la microonda con el macrocristal  $M_2$  interpuesto.

1. Posición (100). A continuación se quitó el macrocristal  $M_1$  y se colocó sobre la mesa T el macrocristal  $M_2$  de manera que el plano vertical (100) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

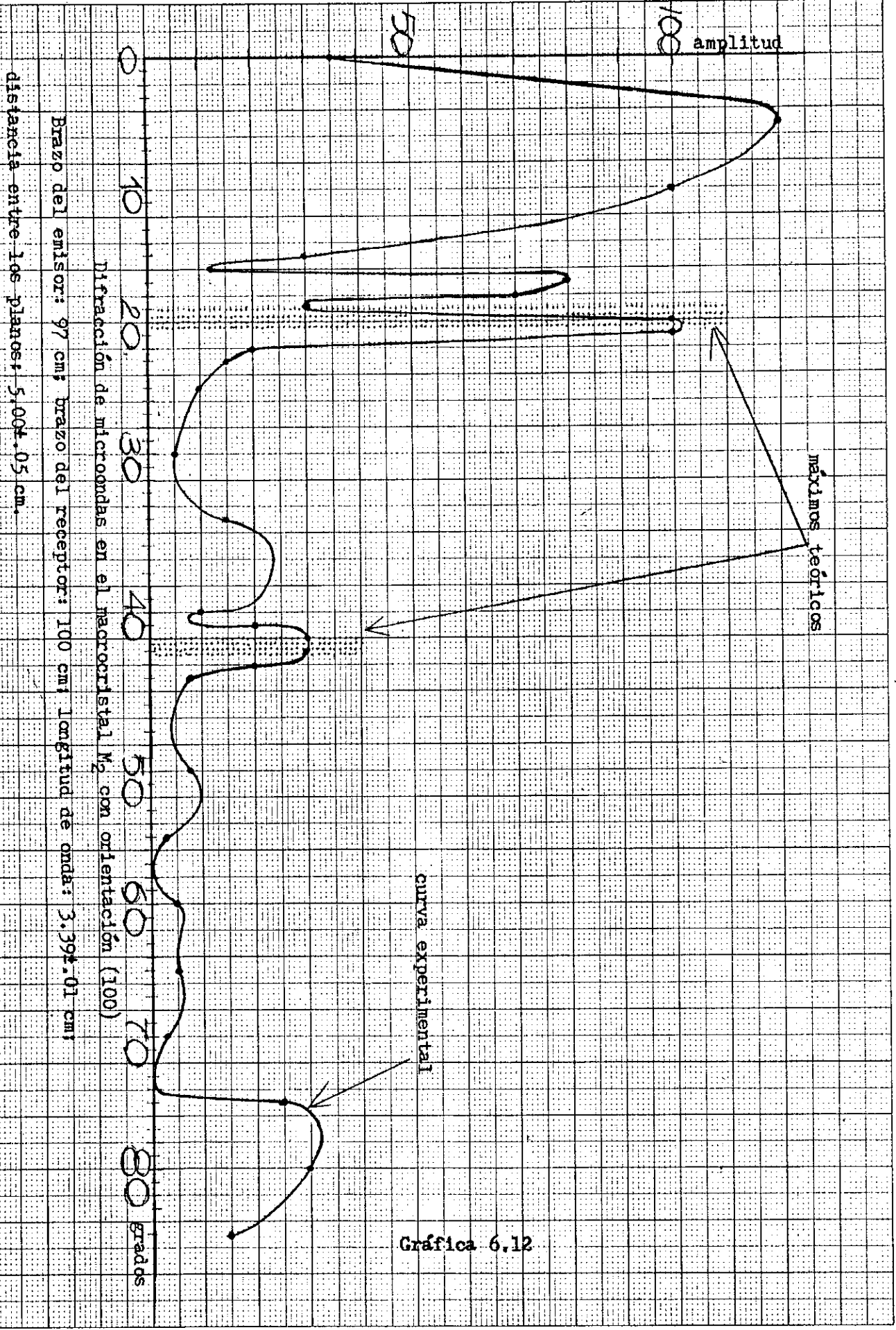
Distancia receptor-eje de giro: 100 cm.

Distancia entre los planos de reflexión:  $5.00 \pm 0.05$  cm.

Tabla 6.6  
Angulos teóricos y experimentales

$\theta$	$n = 1$	$n = 2$
Teór.	$19^\circ 49' \pm 13'$	$42^\circ 41' \pm 34'$
A	$20^\circ 30'$	$42^\circ 30'$
A'	$19^\circ 00'$	$42^\circ 00'$
A''	$17^\circ 00'$	$43^\circ 00'$
B	$19^\circ 00'$	$43^\circ 00'$
B'	$19^\circ 00'$	$43^\circ 00'$
B''	$19^\circ 00'$	$43^\circ 00'$

En el renglón A aparecen los valores de los dos máximos obtenidos experimentalmente. Se hizo variar para esto el ángulo de incidencia desde  $0^\circ$  hasta  $85^\circ$ , haciendo una observación cada cinco grados, exceptuado en las vecindades de los máximos previstos, o sea, entre los  $15^\circ$  y  $22^\circ$  y entre los  $40^\circ$  y  $45^\circ$ , en cuyos intervalos las observaciones se hicieron de grado en



grado.

En el apéndice B aparecen los datos numéricos y la gráfica correspondiente es la 6.12.

El primer máximo experimental es esperado entre  $19^{\circ}36'$  y  $20^{\circ}02'$  y aparece en  $20^{\circ}30'$ , con un corrimiento de  $28'$ .

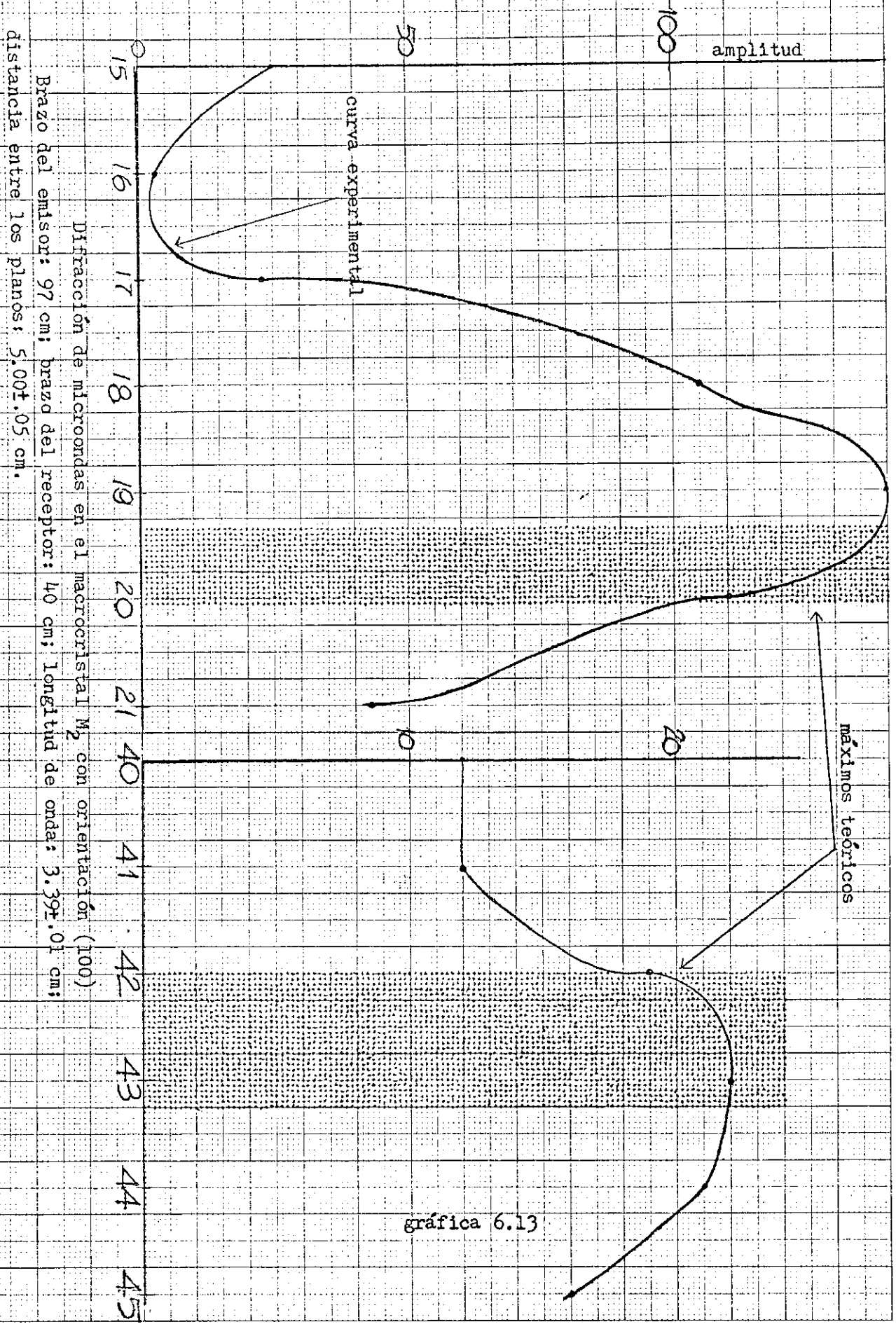
El segundo máximo aparece experimentalmente de acuerdo con la teoría entre  $42^{\circ}07'$  y  $43^{\circ}15'$ .

En la gráfica 6.12 aparece un tercer máximo en el extremo derecho, alrededor de los  $80^{\circ}$ , que correspondería, a paridad de las otras condiciones, a una distancia entre los planos de 5.26 cm en lugar de 5.00 cm, o a una longitud de onda de 3.28 cm en lugar de 3.39 cm, o a unos valores intermedios, por ejemplo, a una distancia entre los planos de 5.1 cm y a una longitud de onda de 3.35 cm.

En el renglón B de la tabla 6.6 aparecen los valores de otros máximos experimentales correspondientes a la gráfica 6.13, y cuyos datos numéricos están en el apéndice E.

Estas observaciones se hicieron grado por grado entre  $15^{\circ}$  y  $21^{\circ}$  y entre  $40^{\circ}$  y  $45^{\circ}$ . El emisor estaba a 97 cm y el receptor a 40 cm del eje de giro.

El primer máximo experimental aparece a los  $19^{\circ}$ , adelantado  $36'$  con respecto a lo previsto teóricamente, mientras el segundo máximo cae experimentalmente entre los límites teóricos.



Difracción de microondas en el macrocristal  $M_2$  con orientación (100)

Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 40 cm; Longitud de onda: 3.397.01 cm;

distancia entre los planos: 5.007.05 cm.

2. Posición (110). Se reorientó el macrocristal  $M_2$  de manera que el plano vertical (110) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 40 cm.

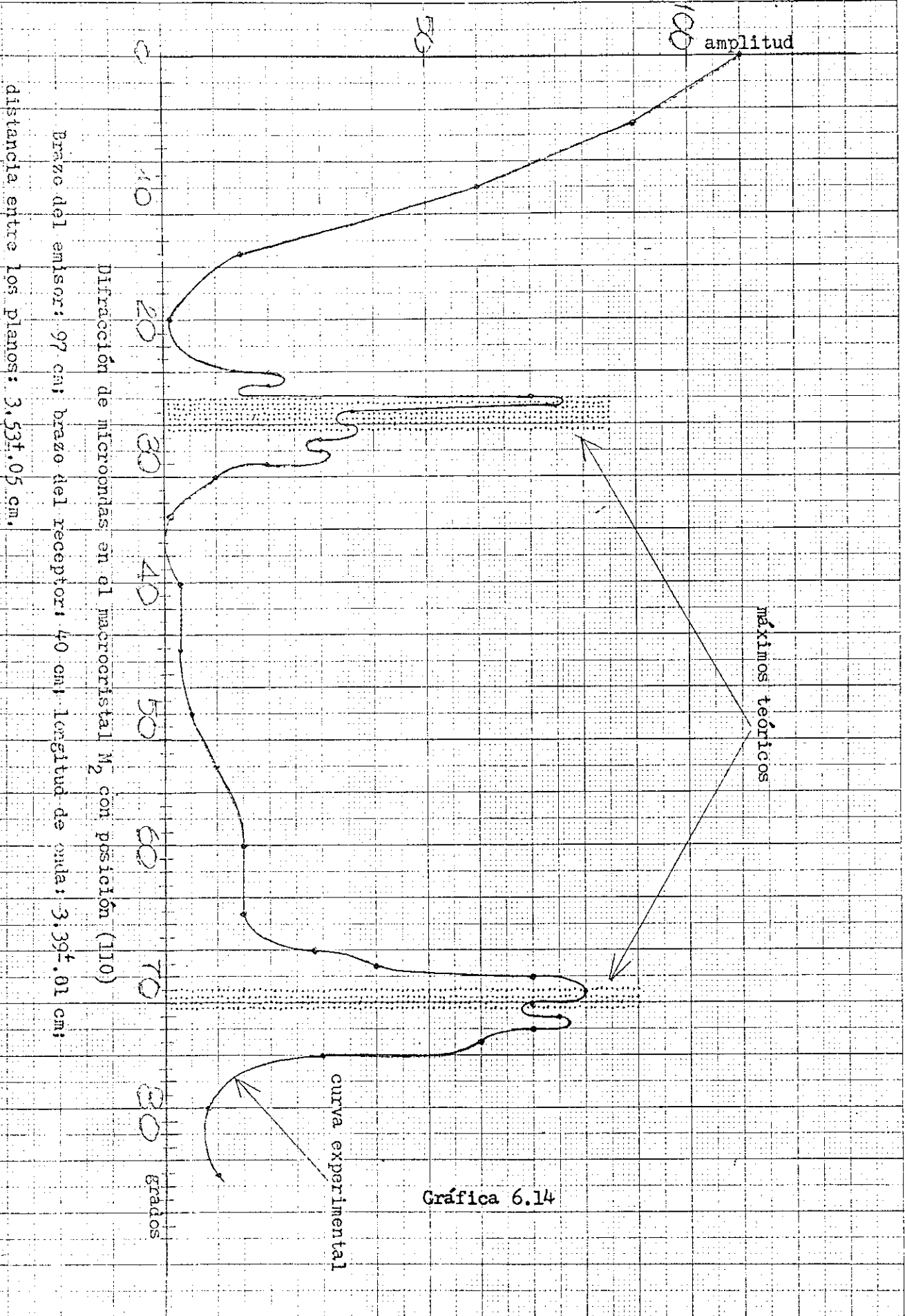
Distancia entre los planos de reflexión:  $3.53 \pm .05$  cm.

Tabla 6.7  
Ángulos teóricos y experimentales

$\theta$	n = 1	n = 2
Teór.	$28^\circ 39' \pm 27'$	$72^\circ 32' \pm 3^\circ 05'$
A	$26^\circ 00'$	$71^\circ 00'$
A'	$28^\circ 00'$	$71^\circ 00'$
A''	$26^\circ 00'$	$72^\circ 00'$
B	$28^\circ 30'$	$72^\circ 30'$
B'	$28^\circ 25'$	$72^\circ 30'$
B''	$28^\circ 45' - 29^\circ 25'$	$72^\circ 25' - 73^\circ 00'$

En el renglón A aparecen los valores de los dos máximos experimentales obtenidos variando el ángulo de incidencia entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , haciéndose observaciones cada cinco grados hasta los  $20^\circ$ , de grado en grado entre los  $24^\circ$  y  $32^\circ$  y entre los  $68^\circ$  y  $72^\circ$ . Las demás observaciones se hicieron cada cuatro grados.

La gráfica es la 6.14 y los datos numéricos se dan en el apéndice B.



Gráfica 6.14

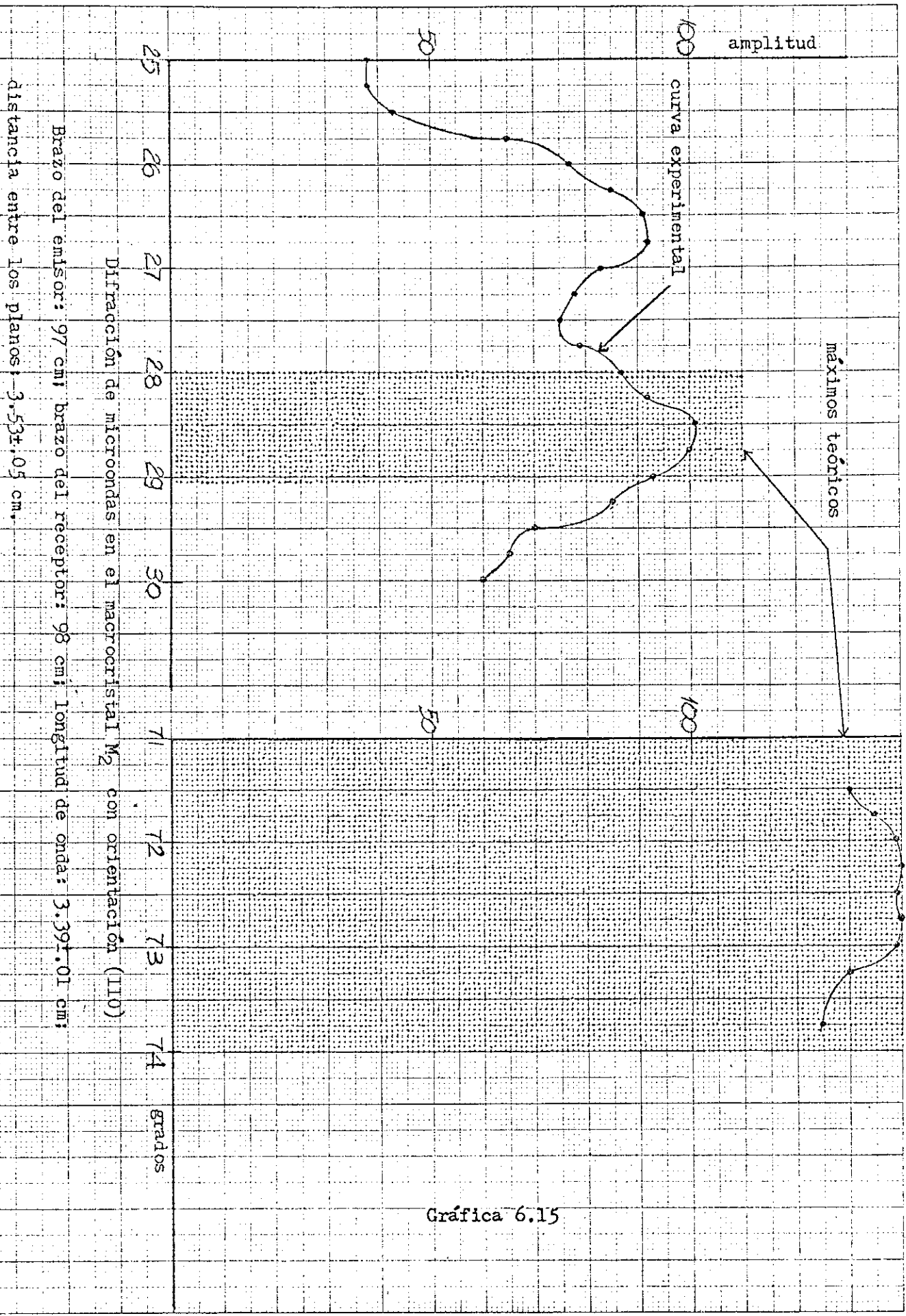
De los dos máximos previstos, el segundo, en las vecindades de los  $73^\circ$ , cae experimentalmente dentro de los márgenes de error del cálculo teórico, mientras el primero, valuado teóricamente entre los  $28^\circ 12'$  y  $29^\circ 06'$ , cae experimentalmente en los  $26^\circ$ , adelantándose en más de dos grados. Cabe atribuirlo a una deficiente orientación del macrocristal.

En el renglón B de la tabla 6.7 aparecen nuevos valores de los máximos experimentales estando el macrocristal en la misma posición. A éstos se refiere la gráfica 6.15, mientras los datos numéricos están en el apéndice E. Las observaciones se hicieron de  $15'$  en  $15'$  entre  $25^\circ$  y  $30^\circ$  y entre  $70^\circ 30'$  y  $74^\circ 30'$ .

El emisor y el receptor estaban ambos a 98 cm del eje.

El segundo máximo experimental está de acuerdo con lo previsto teóricamente, mientras que para el primer máximo se obtiene un resultado experimental que llama la atención por su frecuencia: sobre 30 experimentos hechos para  $M_2$  en posición (110) entre  $25^\circ$  y  $32^\circ$  de  $15'$  en  $15'$ , 24 (el 80%) han dado un doble máximo evidente, que en el caso presentado en este trabajo es a los  $26^\circ 30'$  y  $28^\circ 30'$ .

La razón sugerida de este fenómeno es que el haz de microondas presenta cierta divergencia horizontal, lo cual haría posible la aparición de un máximo secundario en la vecindad derecha o izquierda del máximo previsto.



Distancia entre los planos: 3.531.05 cm.  
Brazo del emisor: 97 cm; brazo del receptor: 98 cm; longitud de onda: 3.391.01 cm;  
Difracción de microondas en el macrocristal  $M_2$  con orientación (110)

Gráfica 6.15

3. Posición (120). A continuación, se reorientó el macrocristal  $M_2$  de manera que el plano vertical (120) quedara paralelo a la recta  $0^\circ-180^\circ$  y se rotaron los brazos del emisor y del receptor hasta que apuntaran  $0^\circ$  y  $180^\circ$  respectivamente.

Distancia emisor-eje de giro: 97 cm.

Distancia receptor-eje de giro: 40 cm.

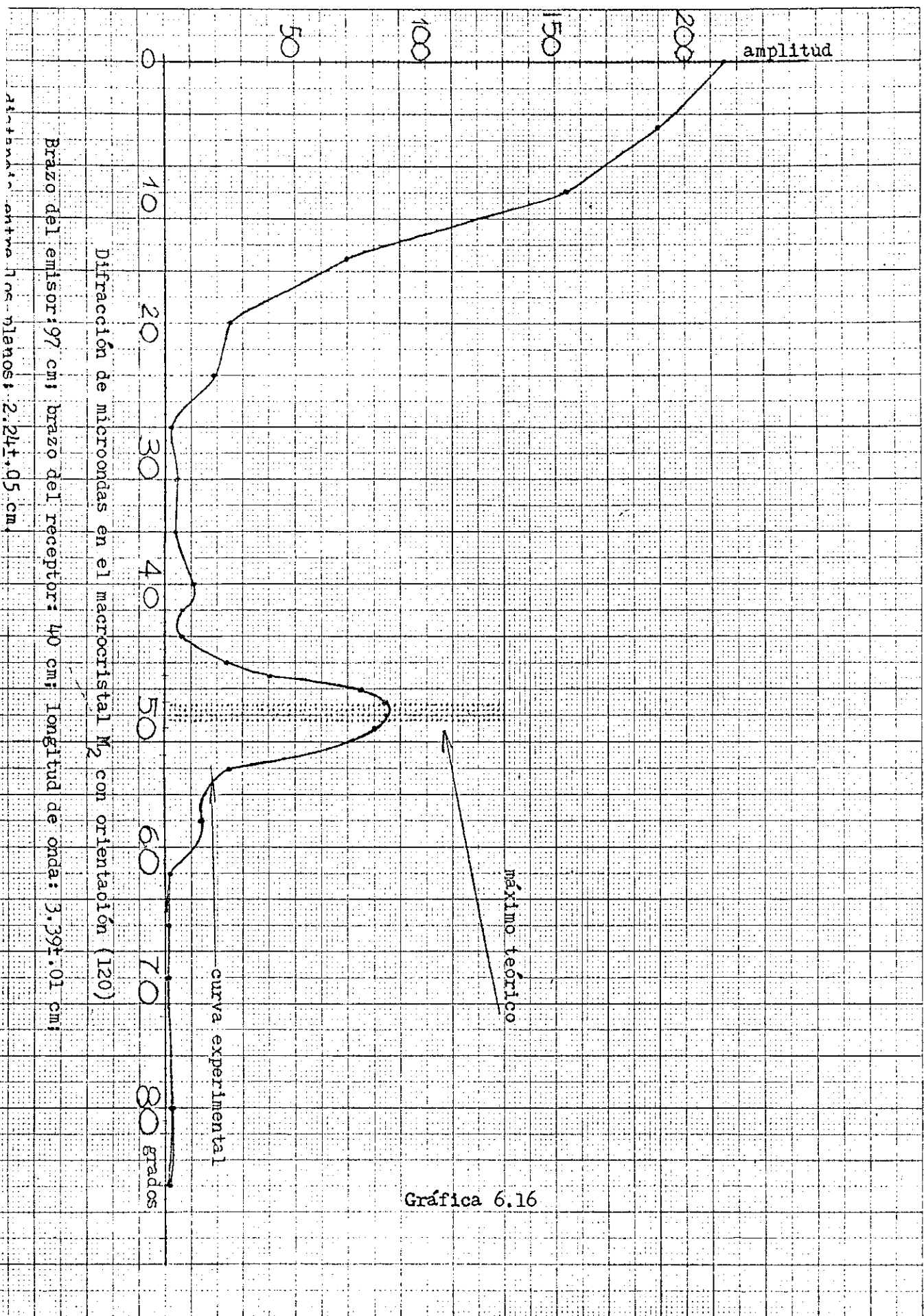
Distancia entre los planos de reflexión:  $2.24 \pm 0.05$  cm.

Tabla 6.8  
Angulos teóricos y experimentales

$\theta$	$n = 1$
Teór.	$49^\circ 19' \pm 1^\circ 31'$
A	$49^\circ 30'$
A'	$50^\circ 00'$
A''	$49^\circ 00'$
B	$50^\circ 00'$
B'	$49^\circ 00'$
B''	$51^\circ 15'$

En el renglón A aparece el máximo experimental conseguido variando el ángulo de incidencia de las microondas con el plano vertical (120) desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ . Las observaciones se tomaron de  $5^\circ$  en  $5^\circ$  entre  $0^\circ$  y  $20^\circ$ , de  $4^\circ$  en  $4^\circ$  entre  $20^\circ$  y  $44^\circ$  y entre  $54^\circ$  y  $70^\circ$ , se tomó una a los  $80^\circ$ , una a los  $86^\circ$ , y entre  $46^\circ$  y  $51^\circ$  se tomaron grado por grado.

Los datos numéricos aparecen en el apéndice B y la gráfica correspondiente es la 6.16.



Gráfica 6.16

Hay perfecta correspondencia entre el máximo experimental y el teórico.

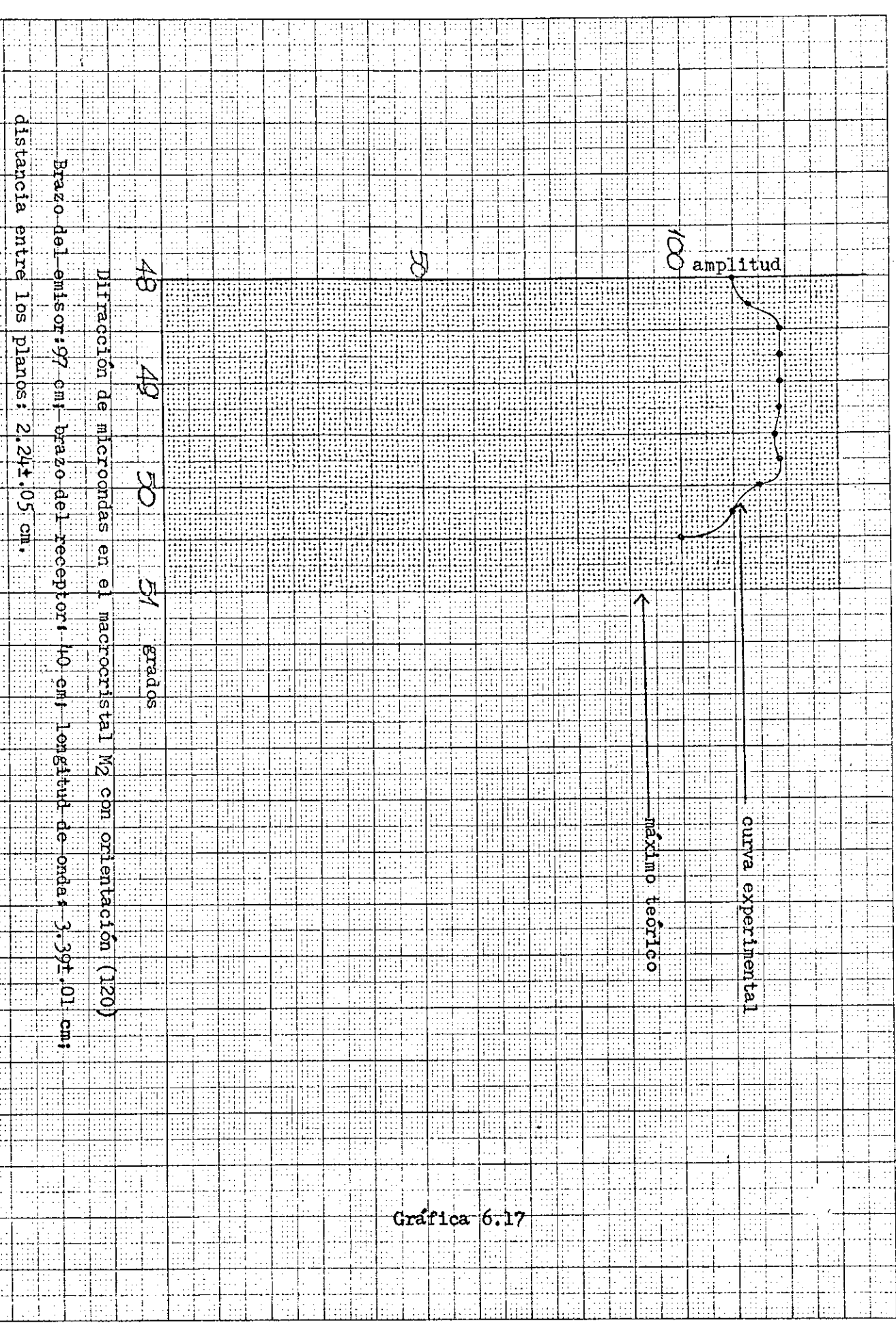
En el renglón B de la tabla 6.8 aparecen nuevos valores de los máximos experimentales, estando el macrocristal en la misma posición. A éstos se refiere la gráfica 6-17, mientras los datos numéricos están en el apéndice E.

Las observaciones se hicieron de 15' en 15' entre 48° y 50°30'.

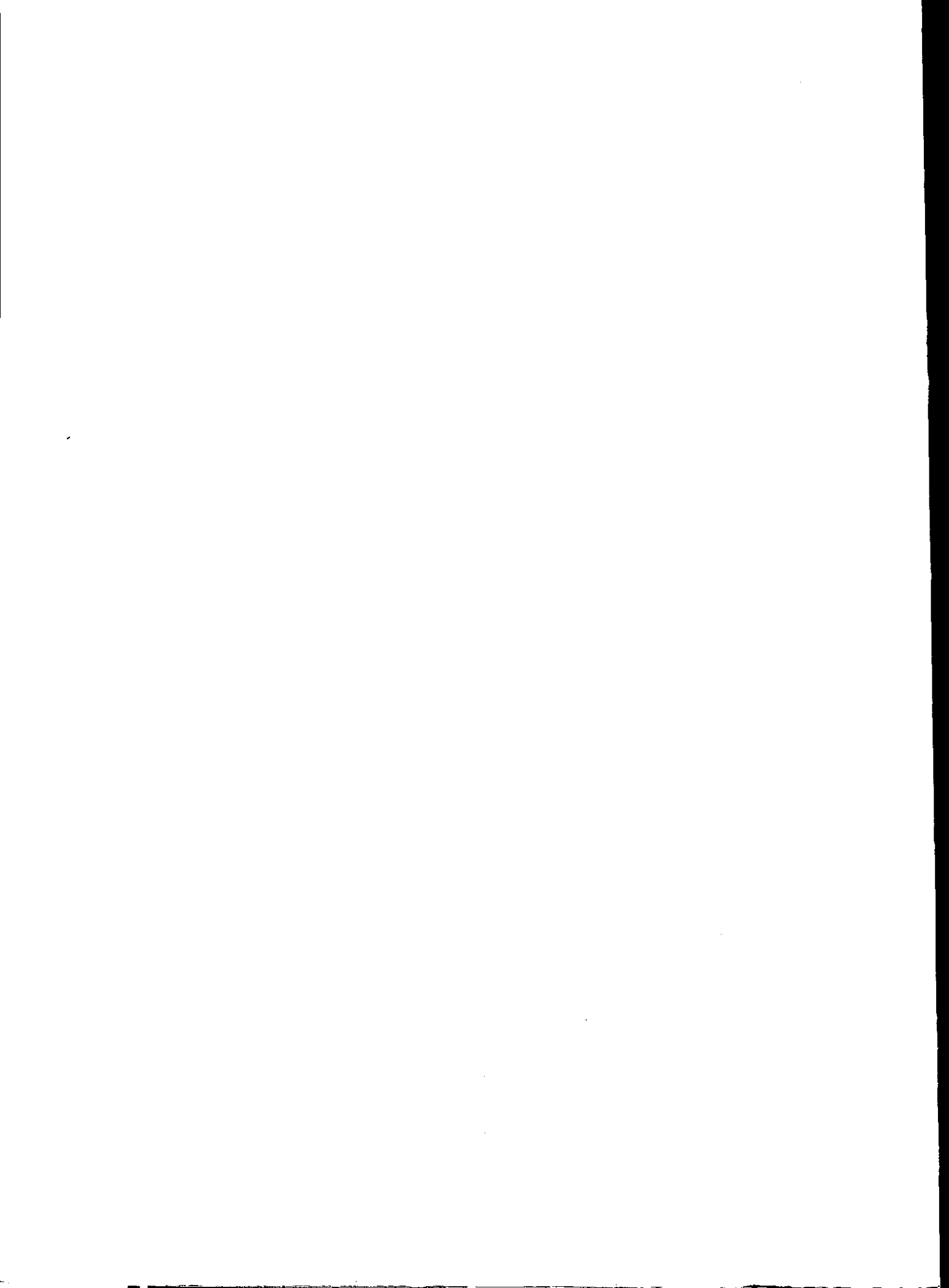
El emisor estaba a 97 cm y el receptor a 40 cm del eje.

Aunque toda la gráfica esté encerrada dentro de los límites teóricos de error, se nota la presencia de un máximo en la vecindad de los 49°.

La posición (120) es la última permitida para el macrocristal  $M_2$  siendo la longitud de onda 3.39 cm.



Gráfica 6.17



## VII. ERRORES

A continuación se enumeran los errores experimentales que afectaron mayormente este trabajo, con la aclaración que muchos de ellos están ligados al experimento actual, pero habría posibilidad de corregirlos, por lo menos en parte, si se dispone, por ejemplo, de mejor material.

### A. Errores mecánicos.

Entendemos por errores mecánicos aquellos que dependen de los aparatos en sí, aunque puedan ser causados por un defecto de construcción. Los principales son:

- En la mesa T (fig. 3.7), el goniómetro G no está perfectamente centrado.

- Los brazos que soportan el emisor y el receptor, por su longitud y su peso tienden a doblarse, y como consecuencia la orientación del macrocristal con respecto a las microondas es algo diferente de la calculada.

- Las esferas metálicas en los macrocristales no están perfectamente alineadas por tres motivos:

- Error al marcar los puntos donde colocar las esferas metálicas en las planchas de duropor.
- Error al perforar con el trépano la cavidad donde alojar las esferas.
- Error debido al corrimiento de las mismas esferas en diferentes direcciones al comprimirlas entre las planchas.

Esta falta de alineación altera el ángulo para el cual se permite interferencia constructiva.

- El haz de microondas no está colimado sino que se abre en abanico, por lo tanto el ángulo que forma con un determinado plano vertical del macrocristal varía de punto a punto.

-Las distancias emisor-macrocrystal y receptor-macrocrystal son pequeñas con relación al tamaño del macrocrystal y a las distancias entre las esferas, y eso motiva que que los ángulos de incidencia con respecto a las diferentes esferas metálicas que componen el macrocristal no sean iguales entre sí. Este hecho no solamente altera el ángulo correspondiente a un máximo, sino que probablemente puede doblar el máximo, como en el caso del macrocristal  $M_2$  en la posición (110) para el orden 1.

#### B. Errores subjetivos.

Los principales errores subjetivos, debidos a fallas del observador, son:

- Error de paralaje al leer los ángulos en el goniómetro.
- Error de paralaje al leer la amplitud de la microonda en la pantalla del osciloscopio.
- Error en la manipulación de los aparatos.

De todos los errores apuntados, se ha tomado en cuenta para los cálculos teóricos únicamente el margen de error al alinear las esferas metálicas en los macrocristales, admitiendo un margen de .05 cm al marcar la posición de cada esfera, correspondiente a la mitad de la menor división de la regla con que se midieron las distancias, y el margen de error en el cálculo de la longitud de onda de las microon-

das, error que resultó ser de .01 cm, calculado de esta manera:

La longitud de diez longitudes de onda osciló entre 33.8 y 34.0 cm. Dividiendo entre diez el promedio, le correspondió a cada onda una longitud de  $3.39 \pm .01$  cm.

Los resultados experimentales encajan en un 75% dentro de estos límites.



## VIII. CONCLUSION

### A. Sumario.

Se ha querido comprobar la ley de Bragg aplicada a microondas que actúan sobre redes pseudo-cristalinas formadas por esferas metálicas y se ha comprobado que, dentro de los límites impuestos por aparatos imperfectos, la ley

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n\lambda$$

es válida.

### B. Comparación de los datos teóricos y experimentales.

En la tabla 8.1 aparecen las discrepancias entre los valores teóricos y los experimentales.

En un total de 14 ángulos, hay ocho ángulos experimentales en la columna A (los que se refieren a las gráficas generales que abarcan todo el cuadrante) que caen dentro de los límites teóricos, o sea el 57%, y hay doce ángulos experimentales en la columna B (los que están en las gráficas detalladas y se refieren a observaciones particularmente cuidadosas) que caen dentro de los límites teóricos, o sea aproximadamente el 86%.

Nótese que de todas las discrepancias entre los límites teóricos y los valores obtenidos experimentalmente una sola supera los 2°, las demás son todas inferiores a 1°.

De esto podemos deducir que efectivamente los factores que más han influenciado el experimento han sido los que se han tomado en cuenta; el error en la medida de las dis-

tancias entre las esferas metálicas y el error en el cálculo de la longitud de onda.

Tabla 8.1  
Comparación entre datos teóricos y experimentales

M	hkl	n	áng.teór.	A	discr.	B	discr.	
M <sub>1</sub>	100	1	13°55' - 14°07'	14°00'	0	13°45'	010'	
		2	28°43' - 29°13'	29°00'	0	28°45'	0	
		3	46°07' - 47°03'	46°30'	0	46°30'	0	
		4	73°47' - 77°25'	indefin.		76°00'	0	
		110	1	19°47' - 20°15'	19°00'	47'	20°00'	0
			2	42°34' - 43°47'	42°00'	39'	43°45'	0
		120	1	32°11' - 33°23'	32°00'	11'	32°50'	0
		130	1	48°30' - 51°40'	49°00'	0	50°40'	0
		230	1	58°10' - 63°38'	60°00'	0	60°40'	0
	M <sub>2</sub>	100	1	19°36' - 20°02'	20°30'	28'	19°00'	36'
		2	42°07' - 43°15'	42°30'	0	43°00'	0	
		110	1	28°12' - 29°06'	26°00'	2°+	28°30'	0
			2	70°27' - 76°37'	71°00'	0	72°30'	0
		120	1	47°28' - 50°50'	49°30'	0	50°00'	0

C. Utilidad práctica del experimento.

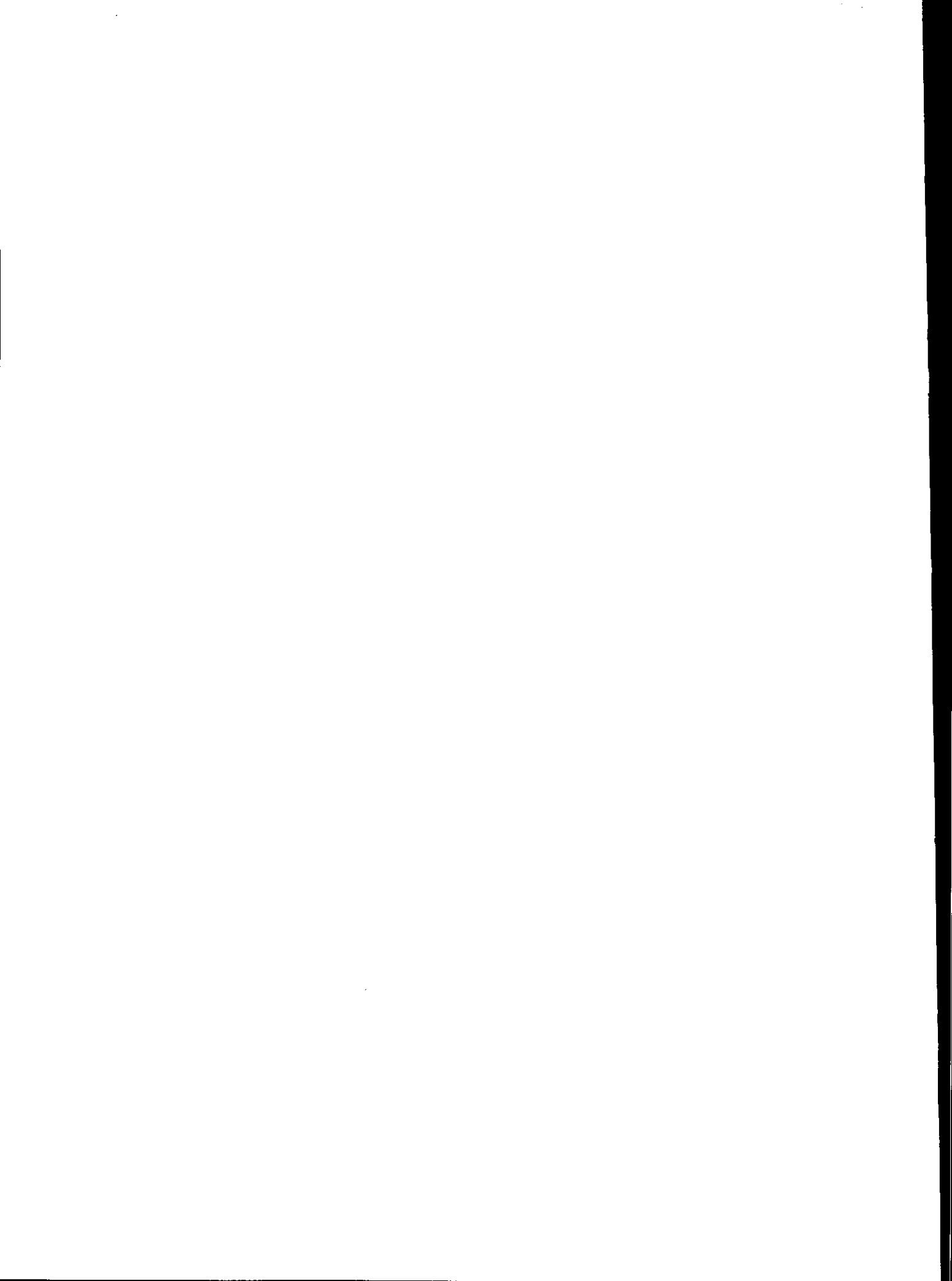
Los resultados obtenidos indican que las microondas y los pseudocristales constituyen una excelente ayuda para el estudio de la cristalografía. Los conocimientos básicos son enfocados macroscopicamente de tal manera que el estudiante ve, practica y mide "átomos", cristales y ondas del tamaño de los objetos corrientes, lo cual facilita la adquisición de ideas claras y distintas en este campo.

Existe además la posibilidad de construir pseudocristales con retícula diferente de la cúbica para un enfoque más completo de la ley de Bragg.

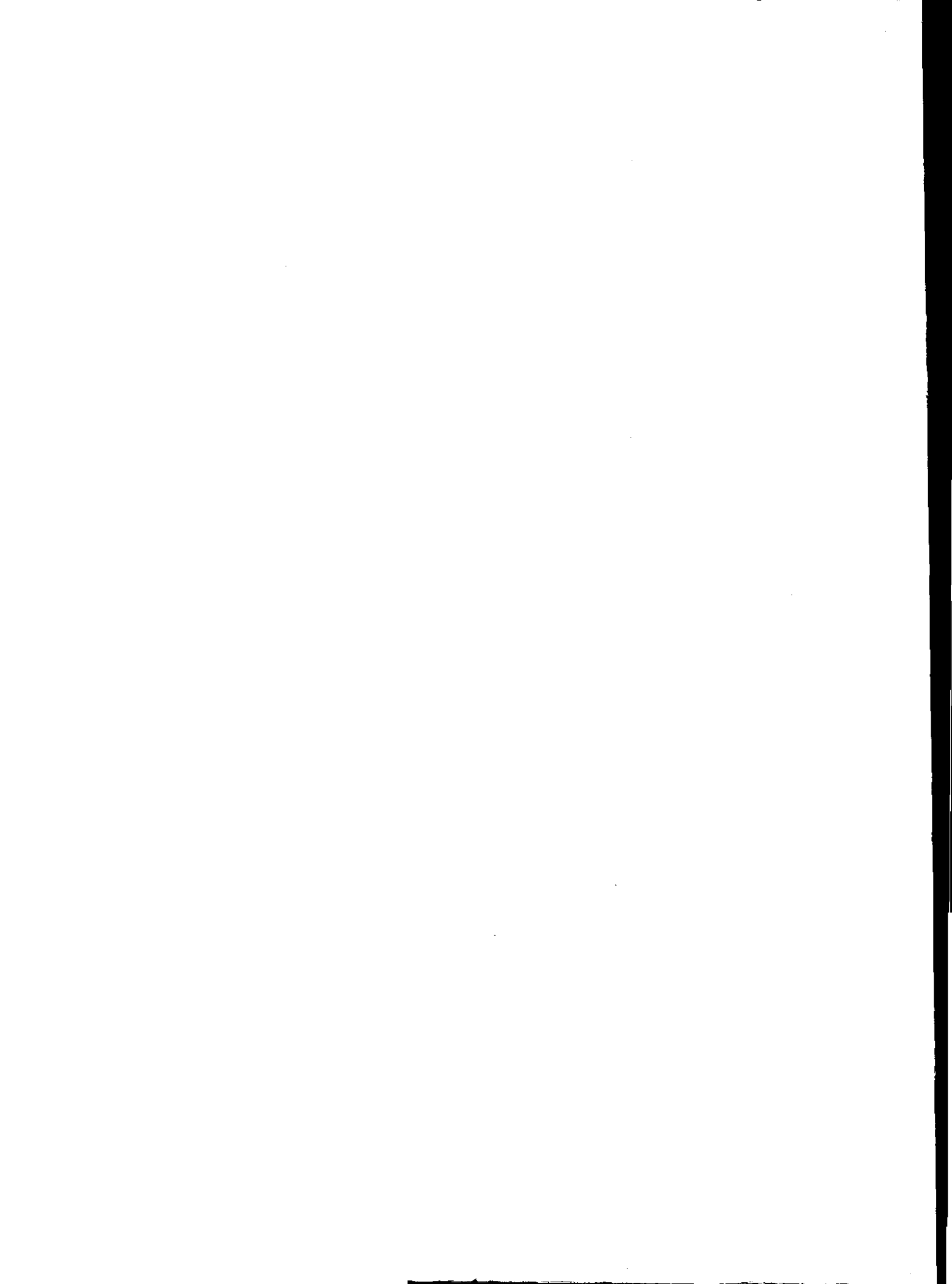


## BIBLIOGRAFIA

- Allen, Roland A. Verification of Bragg's law by the use of microwaves. American Journal of Physics, 23, 1955.
- Baird, D. C. Experimentation. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1962. 198 pp.
- Bevington, Philip R. Data reduction and error analysis for physical sciences. New York, McGraw-Hill Book Company, 1969. 336 pp.
- Brown, Frederick C. The Physics of solids. New York, W.A. Benjamin, Inc., 1967. 415 pp.
- Dekker, Adrianus J. Solid State Physics. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall Inc. 540 pp.
- Huyghens, Christiaan. Treatise on light. New York, Dover Publications, Inc., 1962. 641 pp.
- Kittel, Charles. Introduction to Solid State Physics. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1971. 766 pp.
- Mathews, Jon; R.L. Walker. Mathematical methods of Physics. New York, W.A. Benjamin, Inc., 1965. 475 pp.
- Meiners, Harry F. Physics demonstration experiments, (Vol. I & II). New York, The Ronald Press Company, 1970.
- Murray, William Henry. Microwave diffraction techniques from macroscopic crystal models. American Journal of Physics, 42, 1974.
- Wannier, G.H. Solid State theory. Cambridge U. P., Cambridge, 1960. 270 pp.









Apéndice C

Valores de la amplitud de la microonda  
presente el macrocristal  $M_1$  en la posición (100)

n = 1

Grados	13	$13\frac{1}{4}$	$13\frac{1}{2}$	$13\frac{3}{4}$	14	$14\frac{1}{4}$	$14\frac{1}{2}$	$14\frac{3}{4}$	15
Ampl.	139	150	160	163	161	150	143	130	105

n = 2

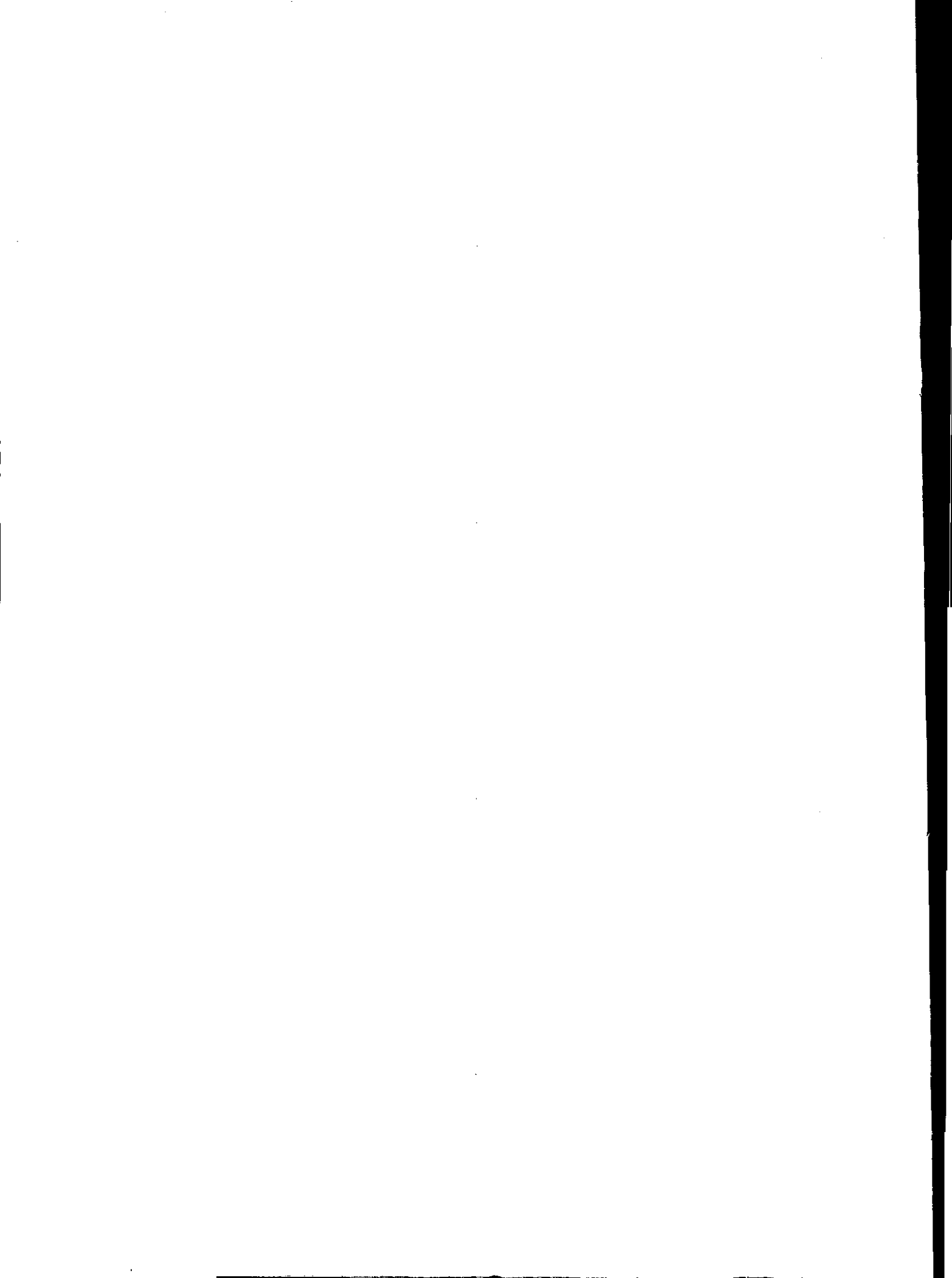
Grados	$27\frac{1}{2}$	$27\frac{3}{4}$	28	$28\frac{1}{4}$	$28\frac{1}{2}$	$28\frac{3}{4}$	29	$29\frac{1}{4}$	$29\frac{1}{2}$	$29\frac{3}{4}$	30	$30\frac{1}{4}$	$30\frac{1}{2}$
Ampl.	35	40	60	65	71	77	75	67	43	37	32	31	31

n = 3

Grados	$45\frac{1}{2}$	$45\frac{3}{4}$	46	$46\frac{1}{4}$	$46\frac{1}{2}$	$46\frac{3}{4}$	47	$47\frac{1}{4}$	$47\frac{1}{2}$	$47\frac{3}{4}$	48
Ampl.	24	25	25	24	24	25	25	25	24	24	22

n = 4

Grados	$74\frac{1}{2}$	$74\frac{3}{4}$	75	$75\frac{1}{4}$	$75\frac{1}{2}$	$75\frac{3}{4}$	76	$76\frac{1}{4}$	$76\frac{1}{2}$	$76\frac{3}{4}$	77
Ampl.	14	14	15	15	16	16	16	16	15	15	14



Apéndice D

Valores de la amplitud de la microonda  
 presente el macrocristal  $M_1$  en las posiciones (110), (120), (130), (230)

$M_1$	(110)	n = 1										
Grados	18	$18\frac{1}{4}$	$18\frac{1}{2}$	$18\frac{3}{4}$	19	$19\frac{1}{4}$	$19\frac{1}{2}$	$19\frac{3}{4}$	20	$20\frac{1}{4}$	$20\frac{1}{2}$	$20\frac{3}{4}$
Ampl.	12	11	11	17	34	41	71	89	93	91	83	68

$M_1$	(110)	n = 1				
Grados	21	$21\frac{1}{4}$	$21\frac{1}{2}$	$21\frac{3}{4}$	22	
Ampl.	41	34	28	29	32	

$M_1$	(110)	n = 2										
Grados	41	$41\frac{1}{4}$	$41\frac{1}{2}$	$41\frac{3}{4}$	42	$42\frac{1}{4}$	$42\frac{1}{2}$	$42\frac{3}{4}$	43	$43\frac{1}{4}$	$43\frac{1}{2}$	$43\frac{3}{4}$
Ampl.	23	26	27	29	32	36	39	40	41	41	42	43

$M_1$	(110)	n = 2			
Grados	44	$44\frac{1}{4}$	$44\frac{1}{2}$	$44\frac{3}{4}$	45
Ampl.	42	42	41	39	37

$M_1$	(120)	n = 1									
Grados	31	$31\frac{1}{4}$	$31\frac{1}{2}$	$31\frac{3}{4}$	32	$32\frac{1}{4}$	$32\frac{1}{2}$	$32\frac{3}{4}$	33	$33\frac{1}{4}$	$33\frac{1}{2}$
Ampl.	37	37	34	33	33	36	39	40	40	38	34

$M_1$	(130)	n = 1											
Grados	48	$48\frac{1}{2}$	49	$49\frac{1}{4}$	$49\frac{1}{2}$	$49\frac{3}{4}$	50	$50\frac{1}{4}$	$50\frac{1}{2}$	$50\frac{3}{4}$	51	$51\frac{1}{2}$	52
Ampl.	17	17	18	19	20	20	20	20	20	21	20	19	18

$M_1$	(230)	n = 1											
Grados	57	58	$58\frac{1}{2}$	59	$59\frac{1}{2}$	$59\frac{3}{4}$	60	$60\frac{1}{4}$	$60\frac{1}{2}$	$60\frac{3}{4}$	61	$61\frac{1}{4}$	$61\frac{1}{2}$
Ampl.	16	19	19	19	20	20	20	20	21	21	21	19	19

$M_1$	(230)	n = 1		
Grados	62	63	65	
Ampl.	17	12	7	

Apéndice E

Valores de la amplitud de la microonda  
 presente el macrocristal  $M_2$  en las posiciones (100), (110), (120)

$M_2$	(100)	n = 1						
Grados	15	16	17	18	19	20	21	
Ampl.	25	3	23	105	140	110	43	

$M_2$	(100)	n = 2					
Grados	40	41	42	43	44	45	
Ampl.	12	12	19	22	21	16	

$M_2$	(110)	n = 1											
Grados	25	$25\frac{1}{4}$	$25\frac{1}{2}$	$25\frac{3}{4}$	26	$26\frac{1}{4}$	$26\frac{1}{2}$	$26\frac{3}{4}$	27	$27\frac{1}{4}$	$27\frac{1}{2}$	$27\frac{3}{4}$	28
Ampl.	38	38	43	65	77	85	91	92	83	78	75	79	87

$M_2$	(110)	n = 1							
Grados	$28\frac{1}{4}$	$28\frac{1}{2}$	$28\frac{3}{4}$	29	$29\frac{1}{4}$	$29\frac{1}{2}$	$29\frac{3}{4}$	30	
Ampl.	92	101	100	93	85	70	65	60	

$M_2$	(110)	n = 2									
Grados	$71\frac{1}{2}$	$71\frac{3}{4}$	72	$72\frac{1}{4}$	$72\frac{1}{2}$	$72\frac{3}{4}$	73	$73\frac{1}{4}$	$73\frac{1}{2}$		
Ampl.	130	135	139	140	139	140	138	130	125		

$M_2$	(120)	n - 1									
Grados	48	$48\frac{1}{4}$	$48\frac{1}{2}$	$48\frac{3}{4}$	49	$49\frac{1}{4}$	$49\frac{1}{2}$	$49\frac{3}{4}$	50	$50\frac{1}{4}$	$50\frac{1}{2}$
Ampl.	110	113	119	119	119	119	118	119	115	110	100

