

ESPECTOGRAFO MAGNETICO PARA EL ESTUDIO
DE REACCIONES NUCLEARES*

Marcos Mazari, Ignacio Castro, Fernando Alba y Mario Vázquez R.

Laboratorio Van de Graaff del Instituto de Física
Universidad Nacional Autónoma de México

(Recibido : Diciembre 15 de 1956)

RESUMEN

A broad-range magnetic spectrograph, similar to the one built by the High Voltage Laboratory Group of the Massachusetts Institute of Technology, has been designed and built to be used for nuclear reaction studies of the light nuclei with the 2 Mev, Van de Graaff machine of the National University of Mexico.

Some useful changes were made such as a new design of the vacuum chamber and of the power supply for the stabilization system for the magnet. In the last runs the vacuum in the system as a whole has been of the order of 2×10^{-6} mm Hg. The electronic stabilization system and the nuclear magnetic fluxmeter were put into operation with stabilities of the order of (1/8000). The photographic camera was focused

M. Mazari. Tests de Físico Experimental U.N.A.M. 1956.

and an accurate calibration was carried on using monoenergetic α particles from a Po^{210} standard source.

Optic characteristics and limitations of the spectrograph are discussed in detail, as well as the equations including relativistic corrections to be used in the calculation of nuclear reactions where particles are involved.

The Van de Graaff machine was improved by means of a strong focusing electrostatic lens placed between the deflecting magnet and the target chamber, in order to avoid elastic scattering that produces a high background in the spectra when slits or diaphragms are used.

As examples of the accuracy in the studies that can be carried out with the new instrument, a $\text{O}^{16}(d,p)\text{O}^{17}$ reaction was studied in order to determine whether the first excited state of O^{17} was a doublet or a singlet. The oxygen reaction and elastic scattering on C^{12} and Au^{197} were used to calibrate the radius of curvature of the deflecting magnet. Due to the cross section studies that the laboratory is carrying on using fast neutrons and to the general interest in knowing the accurate Q value of the reaction $\text{T}(d,\alpha)n$, exposures at 90° , 80° and 60° with respect to the direction of a beam hitting a tritium target, were done bombarding it with 0.63 Mev deuterons. The mean Q value obtained including relativistic corrections is 17.580 ± 0.025 Mev.

The outstanding characteristics of this spectrograph are the high resolution energy range (2.74) covered simultaneously in an exposure and the possibility of rotating the spectrograph from 0° to 130° with respect to the beam direction.

TEXT O

- I. Introducción
- II. Diseño
- III. Vacío
- IV. Electrónica
- V. Óptica
- VI. Enfoque y calibración
- VII. Geometría
- VIII. Revelado, microscopía y dibujo
- IX. Mecanismo de las reacciones nucleares
- X. Lente electrostática
- XI. Primeros experimentos
- XII. Costo
- XIII. Agradecimientos

LISTA DE FIGURAS DEL TEXTO

1. Caja de los polos para presiones de 10^{-5} mm Hg del espectrógrafo del M. I. T. y del de la U.N.A.M.
2. Polos pulidos a espejo para el campo magnético (maquinación a 0.0001").
3. Cámara de blancos.
4. Cámara fotográfica descubierta.
5. Plano del proyecto general del espectrógrafo.
6. Esquema del estabilizador del campo magnético del espectrógrafo.
7. Obtención de la resonancia magnética nuclear.
8. Diagrama en bloques del flúxmetro.
9. Sonda del flúxmetro.
10. (a) Señal del litio, y (b) Señal del hidrógeno.
11. I vs B y f del campo magnético del espectrógrafo.
12. Notación para la deducción de las fórmulas ópticas.
13. Dispersión. Comparación entre la teoría y el experimento.
14. Amplificación. Comparación entre la teoría y el experimento.
15. Resolución. Comparación entre la teoría y el experimento.
16. Curva de calibración D vs ρ (Distancia sobre las placas vs radio de curvatura).
17. Geometría del espectrógrafo de la U.N.A.M.
18. Variación del ángulo sólido con la distancia D sobre las placas.
19. Primer estado excitado del O^{17} .

I. INTRODUCCION

Uno de los grupos que más se ha distinguido en la investigación de reacciones nucleares de gran precisión ha sido el del Laboratorio de Alto Voltaje del Instituto Tecnológico de Massachusetts (M.I.T.). En el año de 1931 el Dr. R. J. Van de Graaff¹ con otros investigadores, iniciaron una serie de trabajos orientados a la construcción de generadores electrostáticos para acelerar partículas cargadas; estas investigaciones continuaron intensamente hasta el año de 1948, en el que los doctores Van de Graaff, Trump y Buechner, publicaron un artículo² describiendo globalmente todos los elementos fundamentales de diseño, construcción y operación de estas máquinas; ellas se siguen utilizando como aceleradores para la investigación y la radioterapia de altas energías, sin modificaciones importantes. Se ha reconocido que este tipo de acelerador es uno de los más útiles para la obtención de haces homogéneos y prácticamente monoenergéticos de partículas cargadas, indispensables para el estudio preciso de las reacciones nucleares. La demanda de investigaciones de alta precisión se debe a que la teoría se encuentra suficientemente avanzada para poder predecir ya muchos de los fenómenos del núcleo que requieren verificación. Se espera que la información obtenible con los métodos que a continuación se describen, pueda orientar a la teoría para el estudio de las fuerzas nucleares y se logre formular un modelo de la estructura nuclear.

Para las energías alcanzadas en estos aceleradores (de 0.5 a 9 Mev, y se tienen noticias de la probable producción de mayores), fue necesario el diseño y la construcción de campos magnéticos selectores³ a fin de obtener haces de partículas cargadas casi monoenergéticas.

El mismo grupo del M.I.T., a partir de 1948, puso en funcionamiento equipos adicionales a los aceleradores que fueron capaces de analizar con todo detalle los productos de las reacciones nucleares provocadas artificialmente.

¹"A 1,500,000 Volt Electrostatic Generator". R. J. Van de Graaff. Phys.Rev. 38, 1919, (1931).

²"Electrostatic Generator for the Acceleration of Charged Particles". R.J. Van de Graaff J.G. Trump and W.W. Buechner. Reports on Progress in Physics XI, 1 (1948).

³"The Determination of Nuclear Energies by Deflection Measurements". W.W. Buechner, Progress in Physics, Frish (no ha sido publicado el número de 1955).

Se construyó en esa época un espectrógrafo magnético con enfoque de 180° ⁴ usando placas fotográficas como detectores, y durante cinco años obtuvieron una gran cantidad de espectros nucleares con él, desgraciadamente sólo a 90° respecto al haz de partículas incidentes, debido a la geometría del aparato.

Posteriormente, en 1951, se inició la construcción de un tipo distinto de espectrográfo, en el que simultáneamente era posible obtener una gran amplitud de espectros y las distribuciones angulares correspondientes⁵, sumamente útiles para identificar características del núcleo, como por ejemplo, su momento angular.

De un estudio comparativo del Dr. W.W. Buechner entre varios tipos de espectrómetros y espectrógrafos³, se concluyó que el último de los aparatos mencionados, en unión con máquinas Van de Graaff, ofrece grandes ventajas sobre otros espectrógrafos, especialmente por la sencillez de la fabricación de los polos, ya que éstos son circulares. Se vió que este aparato satisfacía plenamente las necesidades del laboratorio Van de Graaff de la U.N.A.M., por lo que se decidió construir un espectrógrafo analizador⁶ para el estudio de los núcleos ligeros.

Algunas de las características sobresalientes que tiene este tipo de analizador son:

- a) Gran amplitud simultánea de espectros.
- b) Posibilidad de efectuar distribuciones angulares entre 0° y 130° .
- c) Relativamente poca alteración y contaminación de los blancos debido a las bajas exposiciones requeridas.
- d) Obtención en las placas fotográficas hasta de cinco espectros sucesivos sin admitir aire en la cámara de vacío del aparato.
- e) Fácil lectura de las trazas nucleares (sólo debe contarse al microscopio el número de ellas en fajas sucesivas de 0.5 o 0.25 mm de ancho).

⁴"Excited states in Li^7 from the $Li^6(d,p)Li^7$ and $B^9(d,\alpha)Li^7$ Reaction". W.W. Buechner C.G. Stergiopoulos and A. Sperduto. Phys.Rev. 74, 1569 (1948).

⁵"Magnetic Spectrograph for Nuclear Disintegration Studies". W.W. Buechner, C.P. Browne, H. Enge, M. Mazari and C.D. Buntschuh. M.I.T. Phys.Rev. 95, 609 (1954).

⁶Proyecto de un Espectrógrafo Magnético para Estudios Nucleares. M. Mazari. Congreso de Física en Guadalajara, Jal. 1954 (no publicado).

- f) Medición absoluta de intensidades bajo un ángulo sólido determinado y comparación relativa de las mismas entre varios niveles del mismo espectro, gracias a la técnica electrónica desarrollada para la estabilización y medición de campos magnéticos.

Este proyecto fue acogido con entusiasmo por los Doctores Nabor Carrillo, Rector de la U.N.A.M., Alberto Barajas, Director de la Facultad de Ciencias y Carlos Graef Fernández, Director del Instituto de Física, terminándose de construir el instrumento en septiembre de 1956.

Desde el punto de vista técnico, se contó con la ayuda del Dr. W.W. Buechner del M.I.T., quien se mantuvo en contacto con el grupo del Van de Graaff y fué invitado varias veces a México a observar y resolver las dudas que se presentaban durante el desarrollo del trabajo.

También se tuvo la ayuda desinteresada de Ingenieros Civiles Asociados y su taller del Laboratorio de Mecánica de Suelos, del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., y del Observatorio de Tonantzintla. La maquinación de muchas piezas se realizó en Industria Eléctrica de México y Talleres Arias, habiéndose construido la mayoría de los elementos mecánicos directamente por el personal del taller del Instituto de Física. Los circuitos electrónicos que requiere el aparato también se fabricaron en este laboratorio.

El equipo de conjunto, acelerador electrostático de Van de Graaff y espectrógrafo magnético, ponen a este laboratorio en un lugar privilegiado con respecto a otros laboratorios del mundo para la ejecución de trabajos de alta precisión en el estudio de reacciones en los núcleos ligeros.

II. DISEÑO

Fundamentalmente el diseño del espectrógrafo se basó en una geometría semejante a la del instrumento del M.I.T.^{5 y 7}, principalmente por haber visto que los resultados obtenidos con ella eran muy favorables, así como por el ahorro de tiempo que significaba tanto en el enfoque como en la calibración del equipo. Se usaron además los dispositivos electrónicos que permiten tener un control eficaz de la operación del espectrógrafo, semejantes a los de aquel Laboratorio.

Se hicieron algunas mejoras en el nuevo instrumento que la práctica sugirió dadas las dificultades que con el modelo original se tuvieron. Una de ellas, que se considera importante, es el nuevo diseño de la caja de vacío que envuelve a los polos, principalmente porque el Laboratorio de la U.N.A.M., no cuenta con un detector de fugas de helio como en el M.I.T., además de las molestias y las pérdidas de tiempo que ligeras fugas ocasionan en un sistema como el antiguo. El resultado de este nuevo diseño de caja de vacío, con juntas de hule en las esquinas, fué muy satisfactorio, por lo que se recomienda ampliamente al construir otros aparatos que requieran cámaras de alto vacío (10^{-5} mm Hg). Como puede verse en las perspectivas isométricas de la Fig. 1, en la que se compara el sistema antiguo de caja de vacío con el nuevo diseño, la junta de hule en el primero se encuentra a los lados de la caja y se comprime lateralmente con pernos y placas de fierro ARMCO; al cerrar la caja deben quedar en contacto las piezas de fierro con las tapas y como el hule cede, llega un momento en que no es posible comprimirlo más, requiriendo para su funcionamiento pintar los costados de las cajas con "Gliptal" (pintura para vacío), frecuentemente. Al producirse nuevas fugas se pierde mucho tiempo en localizarlas y repararlas. En el espectrógrafo de la U.N.A.M., las juntas de hule pueden apretarse tanto como se quiera, manteniéndose a los polos siempre en contacto con las tapas laterales de fierro. Puede también destaparse independientemente cada cara sin necesidad de desmontar el espectrógrafo, lo cual es indispensable en el del M.I.T., si se quiere llegar al interior de los polos. La experiencia con el nuevo aparato en este aspecto, demostró que el diseño era más adecuado pues desde el principio el vacío fué satisfactorio; éste se observó por la ionización de una bobina "Tesla" y una bomba mecánica "Leybold", únicos aparatos de que se disponía cuando se hizo el montaje. En el interior de la caja mencionada se dispuso un soporte especial para que los polos pudieran desarmarse sin tocar el marco de fierro que los soporta y cierra el campo magnético, de tal manera que siempre puedan colocarse en la misma posición (Fig. 2). Este detalle es muy importante, ya que en el caso de desarmar el aparato, no es necesario volverlo a enfocar y

⁷"Broad Range Magnetic Spectrograph" . C.P. Browne and W.W. Buechner. 1956.
Comunicación privada.

calibrar, operaciones cuya ejecución requiere hasta un mes de trabajo.

Otra mejora de gran utilidad fueron las rejillas horizontales y verticales entre el blanco y el espectrógrafo, con lo que es posible modificar el ángulo sólido de aceptación de las partículas al campo magnético analizador, sin admitir aire en el aparato.

La masa del espectrógrafo se encuentra suspendida por un juego de tres gatos mecánicos y tres tornillos montados sobre ruedas, ligados todos íntimamente a un marco de fierro triangular, el que puede girar alrededor de un poste central. Se evitan fricciones en el poste central mediante un tablero esférico. Fué posible eliminar torsiones en el marco de apoyo, usando en un apoyo una junta universal y en el otro un bambilete. Todo el equipo se nivela mediante los tornillos mencionados y los gatos mecánicos, comprobando su orientación y altura con aparatos comúnmente empleados en topografía y con micrómetros mecánicos.

La cámara de blancos (Fig. 3) se construyó lo más amplia posible, con el objeto de utilizar en el futuro un dispositivo para el cambio de blancos sin tener que admitir aire en la cámara durante esta operación; también hay espacio para colocar dispositivos especiales que permiten la medida precisa de la corriente del haz de proyectiles, dato necesario para la obtención de secciones nucleares absolutas.

Se tuvo especial cuidado en el diseño y construcción de la cámara fotográfica (Fig.4), elemento del que depende grandemente la precisión del aparato. Todas las partes móviles se montaron en baleros; el portaplacas se dotó de una serie de barritas con sus correspondientes resortes, que obligan a las placas fotográficas a apoyarse sobre la superficie hiperbólica formada por unas guías metálicas (ver inciso d), las cuales impiden desplazamientos aunque el portaplacas se golpee durante su manejo al cargar y descargar el espectrógrafo.

A todas las partes importantes del aparato se les verificó su estado de esfuerzo y deformación, tanto por efectos del peso propio como del vacío y del campo magnético.

En la Fig. 5 se muestra el proyecto original del aparato⁶, el cual se mantuvo prácticamente sin modificaciones, salvo detalles pequeños que fueron apareciendo durante su construcción.

La Compañía "Estructuras y Cimentaciones, S.A." donó los materiales y construyó la plataforma de concreto apoyada en 4 columnas cimentadas en el sótano, cimientos del espectrógrafo; sobre éste se colocó una plancha de fierro de 1" de espesor, sin maquinarla y nivelada al milímetro, la cual fué inyectada posteriormente con lechada de cemento para ligarla con la base de concreto. El peso del espectrógrafo es aproximadamente de 3000 kg.

III. VACIO

Cuando se trabaja con aparatos de este tipo y con presiones del orden de 10^{-5} mm Hg, se presentan grandes dificultades prácticas en estos sistemas debido, fundamentalmente, a las juntas flexibles y a las juntas desplazables. Sin contar las uniones del acelerador Van de Graaff, en el espectrógrafo se tienen unas 46 juntas de hule de muy diferentes tamaños y formas, además de las muchas soldaduras en partes fijas y móviles. Es conveniente mencionar que para localizar la zona del aparato en que se presentan fugas, es sumamente útil la separación de las partes mediante válvulas, dotando con medidores de vacío a cada una de ellas.

El volumen adicional a la máquina Van de Graaff, consistente en los tubos de unión, cámara de blancos, espectrógrafo y cámara fotográfica, asciende a unos 75 litros, volumen que debe evacuarse al alto vacío (10^{-5} mm Hg). Con este fin fué necesario instalar dos bombas mecánicas y dos de difusión de mercurio (para estos estudios se prefieren a las de aceite): el primer juego formado por una bomba de difusión Leybold de 45 lt/seg y una mecánica de la misma marca, destinado al espectrógrafo, succiona desde la cámara fotográfica con el objeto de extraer rápidamente los vapores que sueltan las emulsiones de las placas; y el segundo par de bombas, cerca de la cámara de blancos (una bomba Leybold de 12 lt/seg y una mecánica Cenco), sirven para ayudar por un lado, al espectrógrafo y por otro al acelerador Van de Graaff, ya que las bombas de la máquina se encuentran muy distantes y son insuficientes para lograr un vacío adecuado en un tiempo razonable. Todas las bombas de difusión están dotadas de trampas de aire líquido.

La presión media alcanzada en todo el sistema con este conjunto de bombas resultó ser de 1.8×10^{-5} mm Hg. Se espera que la eliminación de vapores con el

tiempo y ajustes algo más cuidadosos en algunos juntas, permiten abatir la presión a 1×10^{-5} mm Hg, lo cual se considera ideal para este tipo de trabajo. Como se verá más adelante, la presión alcanzada en el espectrógrafo hasta la fecha, de 2.5 mm Hg, permitió efectuar la calibración y las primeras reacciones nucleares.

Los termopares y medidores Philips para la medición del vacío en las distintas partes del aparato se importaron de los Estados Unidos y los circuitos de medida fueron construídos en el laboratorio de la U.N.A.M. Estos medidores se calibraron por comparación con los de ionización instalados en el tubo acelerador de la máquina Van de Graaff. Aunque de esta manera no se cuenta con una calibración absoluta, basta saber el orden de las presiones (1 a 4×10^{-5} mm Hg) para poder intentar el bombardeo de sustancias con partículas aceleradas. Se estima que el error actual en la medida de las presiones no excede de $\pm 0.5 \times 10^{-5}$ mm Hg.

IV. ELECTRONICA

Los dispositivos electrónicos con que cuenta el espectrógrafo, permiten producir y mantener una intensidad uniforme del campo magnético en los 2200 cm^2 de área de los polos, dentro de límites bastante críticos (estabilizador), y medir con alta precisión por medio de un flúxmetro, la densidad del campo magnético durante los intervalos de tiempo en que se hace la exposición de las placas fotográficas.

Los circuitos de estos dispositivos fueron diseñados y construídos por personal de la U.N.A.M., basándose fundamentalmente en ideas desarrolladas por el grupo del M.I.T.⁸; se introdujeron en sus diseños las modificaciones pertinentes para adaptarlas a las condiciones propias del Laboratorio.

El principal factor causante de las variaciones en el campo magnético es la oscilación del voltaje en la línea trifásica que suministra la energía, la cual alcanza valores máximos de $\pm 10\%$. Con objeto de contrarrestar estas variaciones se dispone de un grupo de tres reguladores electromecánicos que las reducen a $\pm 2\%$, y para disminuirlas aún, dada la precisión requerida en el espectrógrafo, se dispone

⁸ "Magnet Current Stabilizer". High Voltage Laboratory. Massachusetts Institute of Technology.

"Nuclear Resonance Fluxmeter". High Voltage Laboratory. Massachusetts Institute of Technology.

de un sistema de estabilización electrónico capaz de introducir compensaciones al voltaje de la línea de alimentación.

El campo es producido por una bobina L (Fig. 6) por la que se hace circular una corriente continua ajustable entre 0 y 13 A y capaz de producir una fuerza magnetomotriz máxima de 21200 Gilberts, suficiente para producir una densidad de flujo de 10.95 kilogauss. Tanto el diseño como la construcción de la bobina se realizaron con un criterio conservador, dada la imposibilidad de efectuar reparaciones posteriores en ella, sin desmontar el espectrógrafo. Se fijó una temperatura límite de trabajo de 40° C; con tal objeto se la dividió en cuatro secciones iguales de 350 vueltas de alambre número 12, esmaltado y con doble forro de algodón. Dichas secciones se encerraron en cajas de cobre refrigeradas por agua. El sistema de refrigeración es capaz de extraer 1700 W. Se protegió con tubos neón cada sección de la bobina, para evitar daños al interrumpir accidentalmente su circuito de alimentación; queda por instalarse un sistema que interrumpa su funcionamiento, cuando la refrigeración sea deficiente.

La configuración del sistema se presenta en el esquema de la Fig. 6.

En la misma Fig. 6 se muestra la fuente de corriente directa que alimenta a la bobina, constituida por tres autotransformadores variables (T_1, T_2, T_3) con flecha de mando común y conectados a una línea trifásica de 50 c/seg, de $120\text{ V} \pm 2\%$. A la salida de los autotransformadores se intercalan las impedancias variables (Z_1, Z_2, Z_3) que pueden alterar el voltaje del rectificador trifásico de válvulas de selenio (S_1, S_2, S_3), el cual provee la tensión necesaria a los extremos de la bobina, cuya corriente (I_L) al pasar por la resistencia de manganín de 0.1 Ohm (R_1) produce una caída de potencial que se utiliza para mantener estable la corriente, como a continuación se explica.

La caída de potencial que produce la corriente en la resistencia de manganín (V_1) se cancela con el potenciómetro R_2 , de manera que el voltaje desarrollado V_2 sea numéricamente igual a V_1 , obteniéndose así una diferencia de potencial nula a la entrada del amplificador A_1 . Cualquier incremento indeseable de corriente provoca un cambio en el voltaje desarrollado en el manganín y también una diferencia de potencial igual a $V_2 - V_1$ a la entrada del amplificador.

Este gobierna las impedancias variables Z_1, Z_2, Z_3 , incrementándolas en el sentido apropiado para que engendren el efecto opuesto al que trataba de producirse en la corriente, cuyas variaciones máximas se reducen a $\frac{1}{8000}$.

FLUXMETRO. El problema de la medición precisa del campo magnético, se solucionó utilizando el fenómeno de resonancia que ocurre en los núcleos de los átomos cuando se les somete a la acción de dos campos magnéticos transversales, uno unidireccional intenso y el otro alterno y pequeño, siempre que la magnitud del primero y la frecuencia del segundo guarden entre sí una relación crítica característica. En varios núcleos la relación giromagnética es conocida con gran exactitud⁹. Para el caso del protón esta relación constante es $k_H = 4.2578$ megaciclos/kilogauss y en el núcleo de litio $k_{Li} = 1.6547$ megaciclos/kilogauss. Los campos magnéticos se determinan mediante la relación

$$B = \frac{f}{k} \quad {}^{10} \quad (1)$$

Una solución acuosa de cloruro de litio y sulfato de manganeso contenida en una cápsula de vidrio, constituye la parte central de una sonda que se introduce en el campo magnético del espectrógrafo para su medición, al mismo tiempo que se aprovecha para provocar la resonancia nuclear combinando su acción con la de un campo transversal de alta frecuencia proporcionado por una pequeña bobina cilíndrica (de 9.5 mm de diámetro exterior), la cual abraza a la cápsula; su eje se orienta perpendicularmente al campo. Midiendo la frecuencia de resonancia, es posible determinar la magnitud del campo unidireccional con una exactitud limitada actualmente por la precisión del medidor de frecuencia, que en este caso resultó ser de $\frac{1}{5000}$.

El fenómeno de resonancia nuclear origina una pequeña absorción de la energía de campo variable de la bobina de la sonda, lo que exteriormente se manifiesta por una leve variación de voltaje y constituye el medio para registrarlo.

⁹ K.V. Pound y W.D. Knight. Rev.Sci. Inst. **21**, 219 (1950).

¹⁰ N.F. Ramsey, in Experimental Nuclear Physics, Ed. Segrè, Vol. II, p. 396, Wiley, Nueva York 1952.

Rodeando a la bobina de alta frecuencia se construyó otra llamada "de barrido", que produce un campo de 50 c/seg, de pequeña intensidad e igualmente orientado que el del espectrógrafo, al que prácticamente no afecta fuera de su área transversal. Cuando la frecuencia es la que corresponde exactamente a la magnitud del campo magnético por medir, ocurre la resonancia a intervalos de tiempo iguales (caso 1, Fig. 7). Cuando la frecuencia es algo mayor o menor (casos 2 y 3) la absorción se presenta a intervalos diferentes.

En la Fig. 8 se muestra un diagrama en bloques del circuito electrónico utilizado para registrar el fenómeno de resonancia nuclear. Está constituido por un oscilador estable, de muy bajo contenido armónico, ajustable entre 8 y 24 megaciclos y un circuito resonante formado por la bobina que rodea a la cápsula y por un juego de condensadores variables y otros fijos que se conectan a voluntad por medio de un interruptor. La resonancia origina una pequeña modulación negativa del voltaje del oscilador z^1 , la cual se envía a un amplificador de radio frecuencia con un ancho de banda de 8 a 24 megaciclos. Después se demodula y amplifica de nuevo hasta un nivel suficientemente alto para excitar un osciloscopio, en el que se produce la modulación. El circuito tiene controles remotos de frecuencia y amplitud de oscilación.

En la Fig. 9 se muestra una fotografía de la sonda tal como fué introducida al campo magnético del espectrógrafo. La línea que conecta a la bobina de alta frecuencia con el oscilador, se construyó para reducir al mínimo posible las pérdidas. Uno de los conductores es el armazón de latón de la propia cámara de vacío y el otro, el tubo soporte de 4.5 cm de diámetro con su pequeña extensión más delgada, ambos recubiertos con plata. Para las mediciones, la sonda se recortó lo más posible que permitía la cámara de vacío, a pesar de lo cual la resistencia de la sonda a estas frecuencias apenas satisface las necesidades para obtener la señal de resonancia nuclear del litio que es la más débil.

En la Fig. 10 (a y b) aparecen respectivamente los oscilogramas de las resonancias nucleares del litio y del hidrógeno.

En la Fig. 11 se muestra la curva típica del campo magnético B en kilo-gauss del espectrógrafo vs la corriente en amperes I de las bobinas, así como I

vs la frecuencia f en megaciclos/segundo del oscilador perteneciente al equipo del flúxmetro. Aun no se ha hecho una buena planimetría del campo magnético entre los polos por no poseer todavía un doble equipo de flúxmetros para su correcta ejecución.

Aunque en un futuro próximo se espera construir un circuito estabilizador y un flúxmetro similares para el magneto deflector, por lo pronto, se seguirá usando el medidor de campos magnéticos montado en esta parte de la máquina de Van de Graaff, que usa la señal de deuterio y cuya constante vale:

$$k_D = 0.65351 \text{ megaciclos/kilogauss.}$$

V. OPTICA

K. T. Bainbridge sugirió originalmente¹¹ la geometría de un campo magnético uniforme circular para dar el mínimo de aberración a un haz de partículas originado en un punto, a una distancia R_0 de los polos, el cual, después de pasar por el campo se vuelve a concentrar en un punto localizado en la normal al rayo incidente y distante R_0 de la superficie de los polos. W.W. Buechner vió que esta misma geometría era aplicable a una amplitud más grande del espectro, simultáneamente, con un mínimo de aberración de las partículas debido al campo magnético disperso. La superficie focal que satisface esta condición, es una hipérbola de ecuación

$$y^2 + 4 R_0 x - 3 x^2 = 0 \quad (2)$$

tomando como ejes de referencias los que se indican en la Fig. 12.

Se sugieren como referencias de consulta sobre la teoría general del enfoque magnético a la (11), y en particular, para el espectrógrafo de que se trata en este escrito, las (7, 12 y 13), donde se publicaron las fórmulas referentes a dispersión, amplificación, aberración y resolución.

¹¹ K.T. Bainbridge, in *Experimental Nuclear Physics*, Ed. Segrè, Part. V, Wiley, Nueva York, 1952.

¹² "Energy Levels of Calcium Isotopes". C.M. Braams. Tesis doctoral, Physics Laboratory der Rijksuniversiteit, Utrecht, Holland (1956).

¹³ "Magnetic Spectrograph Measurements on the $Al^{27}(d,p)Al^{28}$ Reaction". W.W. Buechner, M. Mazari and A. Sperduto. *Phys.Rev.* **101**, 188, 1956.

La dispersión de energía de un campo magnético circular en función del radio efectivo del campo R_0 y de ρ , radio de curvatura de la trayectoria de la partícula en él, se expresa por:

$$\frac{E ds}{dE} = \frac{2\rho R_0^2 \sqrt{10R_0^2 \rho^2 + 9R_0^4 + \rho^4}}{(3R_0^2 - \rho^2)^2} \quad (3)$$

s, desplazamiento en la dirección de la superficie focal.

Generalmente se representan los resultados de la inversa de esta ecuación¹³

$$\frac{dE}{E ds} = \frac{(3R_0^2 - \rho^2)^2}{2\rho R_0^2 \sqrt{10R_0^2 \rho^2 + 9R_0^4 + \rho^4}} \quad (4)$$

Calculando el cambio de energía por unidad de energía y desplazamiento, por ejemplo en las unidades Kev/Mev/mm, para un radio efectivo $R_0 = 41.02$ cm, y superponiendo los valores⁴ experimentales de las zonas más abundantes de trazas nucleares (picos) provocadas por las partículas del polonio que se empleó para calibrar (ver Fig. 13), puede verse que la correlación entre la teoría de enfoque de primer orden y el experimento, es excelente, y que la corrección al radio de los polos de 1.02 cm = 1 entrehierro, debido al campo disperso, es suficiente en una primera aproximación para diseñar un aparato como éste. La teoría de enfoque de segundo orden véase en la referencia (12), por ejemplo.

La expresión de la amplificación para un desplazamiento Δh de un blanco puntual, resulta:

$$\frac{\Delta s}{\Delta h} = \frac{(R_0^2 + \rho^2) \sqrt{10R_0^2 \rho^2 + 9R_0^4 + \rho^4}}{(3R_0^2 - \rho^2)^2} \quad (5)$$

Una gráfica de la amplificación del instrumento se muestra en la Fig. 4, en la que también se compara la teoría con el experimento. Debido a que la fuente de

iones de 0.25 mm no queda perfectamente horizontal, se le supuso para el cálculo teórico, un diámetro efectivo de 0.4 mm (curva llena de la Fig. 14). Se observa que la semianchura de los picos obtenidos en las placas nucleares (rombos), aunque resulta del mismo orden de magnitud que lo predicho por la teoría, son más o menos erráticos y parecen tener un límite inferior de 0.8 mm. La relativamente poca correlación con la teoría, se atribuye principalmente a que la presión lograda en el espectrógrafo durante la calibración fué solamente de 2.5×10^{-5} mm Hg. Obsérvense en la misma figura dos valores que se apartan mucho del conjunto en la zona correspondiente a $\rho = 37.5$ cm; esto sucedió cuando en el espectrógrafo la presión subió a 5×10^{-5} mm Hg por la falla de una de las bombas de difusión.

C.M. Braams¹² Pag. 22, define la resolución de momentos por:

$$R = \frac{4 R_0^2}{\phi (R_0^2 + \rho^2)} \quad (6)$$

en la que ϕ es la anchura de la fuente de iones.

En la Fig. 15 se muestra la resolución $R = \frac{\rho}{\Delta \rho}$ experimental del espectrógrafo, obtenida con las rejillas de admisión totalmente abiertas. La resolución teórica calculada para un espesor de fuente de iones monoenergéticos originados en un alambre de $\phi = 0.4$ mm, se incluye en la misma figura. Es natural que una mejoría en el vacío del aparato incrementará notablemente su resolución; para estudios muy especiales ésta puede aumentarse disminuyendo el ángulo sólido de admisión de las partículas (ver capítulo XI). Como se comprende, existe una limitación para la resolución del instrumento: disminuyendo el ángulo sólido de admisión, decrece la intensidad de grupos de partículas obtenibles en un tiempo razonable durante el cual se puedan mantener constantes las condiciones tan críticas de estabilidad del campo magnético, necesarias en estos estudios.

Realmente, el concepto de "resolución" en el sentido anterior, sólo es válido para una fuente monoenergética de partículas, ya que la anchura de los niveles obtenidos en una reacción nuclear y medidos en el espectrógrafo, dependen principalmente de la dispersión en energías del haz incidente y sobre todo del espesor del blanco.

En un análisis de H. Enge¹⁴ sobre la movilidad térmica de las partículas en el blanco, llega a la conclusión de que el efecto de ésta en la obtención precisa de las energías de reacciones nucleares, resulta todavía de un orden de magnitud menor que las energías actualmente observables (~ 0.3 Kev), limitándose las principales causas de distorsión de los picos, a la pérdida de energía de las partículas por el espesor del blanco y el ángulo finito de aceptación de las partículas en el espectrógrafo. La experiencia sugiere la conveniencia de emplear blancos giratorios para evitar el depósito de carbón con el tiempo en un solo lugar, proveniente principalmente del hule y la grasa de las juntas, y como un refinamiento, enfriar los mismos con aire líquido para reducir la movilidad molecular de las sustancias bombardeadas.

En resumen, será indispensable en el futuro tomar cuidados especiales en la preparación de blancos y en la geometría del sistema, a fin de lograr resultados de alta precisión.

VI. ENFOQUE Y CALIBRACION

Como se dijo en el capítulo I, la geometría con la que se construyó la cámara fotográfica sobre los polos, fué semejante a la del espectrógrafo del M.I.T.; empleando las partículas α monoenergéticas del P_{α}^{210} ($E = 5.299$ Mev), se determinó que la curva construída no estaba en foco, puesto que los picos en las placas tenían unos 4 mm de anchura media, debiendo de acuerdo con la teoría (amplificación a 90°), ser del orden de 0.8 mm, ya que el alambre de plata (fuente de alfas) que se sumergió en la solución radioactiva de polonio era de 0.25 mm de diametro.

Mediante una serie de exposiciones usando 5 placas nucleares de $1'' \times 3''$ escalonadas, se determinó experimentalmente la posición óptima de la superficie focal, observando en el microscopio los picos de menor anchura media. La superficie focal resultó a unos 8 mm abajo de la construída. Se corrigió primero aproximadamente, acercando el espectrógrafo 12 mm hacia la cámara de blancos. La distancia definitiva entre el centro de la cámara de blancos y la frontera de los polos

¹⁴ "On Heavy Particles Spectroscopy Technique, its Application to Scattering Mass Analysis and to the $Al^{27}(d,\alpha)Mg^{25}$ and $Al^{27}(d,p)Al^{28}$ Reactions". H. Enge, Tesis Doctoral. Universitetet i Bergen, Noruega, 1954.

quedó a 40.8 cm. En esta nueva posición se repitieron 3 series escalonadas de placas de 3" x 1", determinando con ellas la superficie focal óptima; ésta se ajustó finalmente limando las guías del portaplaca, 2 mm en la parte superior, 1 mm a los 90° y unos 4.5 mm en la parte baja.

Gráficamente la geometría adecuada resultó ser la equivalente a la hipérbola construída con un radio efectivo igual al radio de los polos más un entrehierro debido al campo disperso, cosa que fué bastante aproximada como se vió al comparar los resultados experimentales (dispersión) con la teoría.

Una vez terminados los ajustes mecánicos, instalado el sistema electrónico en el cuarto de control y mejorado el vacío en el conjunto (1.8×10^{-6} mm Hg), se procedió a la calibración precisa del espectrógrafo mediante las partículas α monoenergéticas del Po^{210} cuyo producto $B\rho$ es bien conocido y se emplea como patrón en varios laboratorios ($B\rho = 331.59$ kilogauss-centímetros).

Con la lectura precisa del campo magnético obtenido por la medición de la frecuencia en el flúxmetro, pudo obtenerse directamente el radio de curvatura ρ que siguieron las partículas alfa de energía conocida. La posición de los mismos grupos se refirieron a la coordenada longitudinal impresa en las placas por medio de señales luminosas emitidas por medio de un indicador especial. Por medición directa de las posiciones de trazos de partículas en los microscopios, usando micrómetros de 0.01 mm de aproximación pudo asociarse a cada grupo de partículas alfa de radio de curvatura ρ conocido, una distancia D sobre las placas. La curva de calibración D vs ρ es la base para la determinación de las energías de las partículas cargadas, provenientes de las reacciones nucleares.

Desde luego esta curva de calibración será comprobada por medio de grupos de deuterones y protones rebotados elásticamente en sustancias con masas perfectamente conocidas, y también será ampliada a la zona baja de la tercera placa de la cámara fotográfica, zona que no fué posible cubrir con las alfas del Po por la limitación del campo magnético debido a la saturación del fierro. Conviene mencionar que la curva de calibración fue obtenida con las rejillas horizontales a 3.0 mm ($\alpha = 2.6^\circ$) de abertura y las verticales a 0.50 cm.

Se menciona la posibilidad futura de recortar gran parte del área de los po-

los para aumentar la densidad del campo magnético a valores superiores que 10.9 kilogauss, en caso necesario. No se hizo esto desde un principio por el temor de perder uniformidad en la zona del campo magnético por donde pasan las partículas.

La curva básica de calibración (D vs ρ) del espectrógrafo se muestra en la Fig. 16.

Como en consecuencia de la determinación de energías de partículas elásticamente rebotadas en una sustancia conocida y las emitidas en reacciones nucleares (ver capítulo IX), es posible la obtención precisa de la energía de la partícula incidente antes del choque. Aprovechando este hecho, se calculó el radio de curvatura $\rho_0 = 40.17$ cm del magneto deflector de la máquina Van de Graaff, a partir de las colisiones elásticas del haz de deuterones incidentes con un blanco muy delgado de formvar y oro evaporado (C^{12} y Au^{197}), y de la reacción conocida $O^{16}(d,p)O^{17}$. Como se ve, indirectamente el nuevo equipo permite calibrar al anterior, calibración que es conveniente comprobar con distintos métodos patrón empleados en otros laboratorios.

VII. GEOMETRIA

Una vez fijo el portaplaca y sabiendo que en él se montan tres placas fotográficas de $2'' \times 10''$, se determinan fácilmente los radios de curvatura máximo y mínimo, con lo que la relación de las energías mayor a menor registradas simultáneamente resulta de 2.74, mayor que la del espectrógrafo del M.I.T., que es de 2.45 (ver Fig. 17).

Las mayores energías de partículas que es posible registrar en las condiciones actuales del espectrógrafo resultan respectivamente:

para protones	$E_p = 12.3$ Mev
para deuterones	$E_d = 6.2$ Mev
para tritones	$E_t = 4.1$ Mev
para alfas	$E_\alpha = 12.4$ Mev

Además de la gran amplitud simultánea de espectro, se mencionó que es posible girar el espectrógrafo entre 0° y 130° , ángulos que se miden con un trans-

portador montado en el poste central que soporta la cámara de blancos, a fin de obtener distribuciones angulares de las intensidades de los niveles de energía; con ellas es posible calcular ciertas características esenciales del núcleo, tales como sus momentos angulares y paridades, además de la determinación precisa de los mismos de excitación. Con la observación a distintos ángulos, de niveles de energía en una reacción particular, es posible separar a éstos de grupos intensos producidos por contaminación de sustancias indeseables. Esto resulta especialmente útil en el caso del laboratorio de la U.N.A.M., dada la limitación que se tiene en la energía de los proyectiles (2 Mev), con la que es difícil lograr grandes desplazamientos de los niveles en los espectros a un ángulo dado.

Mediante las ecuaciones que se verán más adelante (capítulo IX), es posible prever la posición de tales niveles, particularmente los muy intensos de C^{12} y O^{16} que siempre se depositan en los blancos, provenientes principalmente del hule y la grasa empleada en las juntas.

Para una anchura constante (10 mm) de espectro a lo largo de las emulsiones fotográficas, el ángulo sólido varía en la forma como se muestra en la Fig. 18. Es indispensable usar esta curva cuando quieran hacerse comparaciones relativas entre intensidades de grupos de partículas. Además, aprovechando estudios futuros de reacciones nucleares, esta gráfica debe determinarse con más precisión.

VIII. REVELADO, MICROSCOPIA Y DIBUJO

El tiempo necesario para el revelado de placas nucleares de 25μ y 50μ de espesor, es relativamente pequeño. Con un revelador Kodak D-19, basta para estos espesores un tiempo de revelado de 10 minutos a la temperatura ambiente, y en unos 30 minutos se fijan las placas. Incluyendo el lavado, en el transcurso de unas dos horas después de salidas del espectrógrafo, puede tenerse un juego de placas listo para analizarse al microscopio. Ha sido muy satisfactorio el secado de las mismas placas, en no más de 10 minutos, con el empleo de un secador de aire caliente. Sistemáticamente se indican las placas con los índices luminosas, antes y después de la exposición en el espectrógrafo, para comprobar que éstas no se han corrido durante su manejo.

Actualmente se exponen tres zonas paralelas a lo largo de las placas, de las cuales se utilizan fajas de 10 mm de ancho. Dentro de la cámara fotográfica es posible trasladar el portaplacas sin admitir aire en la cámara, determinando su posición con un contavuelta acoplado a los tornillos que lo desplazan.

Una vez expuestas y reveladas las placas, se leen al microscopio generalmente en fajas sucesivas transversales de 0.5 mm de ancho y 10 mm de largo. Contando el número de trazos de las partículas (protones, trazos delgados y largos; alfas, trazos cortos y gruesos; y deuterones, trazos intermedios) en cada faja se va cubriendo el espectro buscado (intensidad o número de trazas/0.5 mm vs D).

Es muy cómodo para el personal dedicado a la lectura de las placas, el empleo del campo oscuro seco en los microscopios, así como de formas impresas, incluyendo la tabla de distancias de los índices fijos, para que únicamente se tengan que anotar los datos observados; de esta manera se ahorra mucho tiempo y evítanse errores. Para estos estudios los microscopios disponibles en el Laboratorio fueron dotados de platinas especiales construídas en el taller del Instituto de Física utilizando micrómetros Federal de 2.5 cm de carrera y 0.01 mm de aproximación, con los que se miden las abscisas según el eje longitudinal de las placas.

Ha sido conveniente en estos trabajos, el reconocimiento total de las zonas con lecturas en fajas sucesivas de 0.5 mm de ancho y, una vez localizadas los picos, regresar y comprobar cuidadosamente su posición y forma, leyendo esta vez cada 0.25 mm. El primer reconocimiento se acostumbra dibujar empleando como abscisas las distancias sobre las placas al doble de la escala natural y como ordenadas el número de partículas. La determinación precisa de la distancia en un nivel dado con miras a obtener ρ , se hace en una gráfica ampliada horizontalmente unas 20 o 40 veces y se usa para ello el punto correspondiente sobre la curva, a la tercera parte de la altura del lado de mayor energía (ver capítulo IX).

De la curva de calibración D vs ρ , se obtienen los distintos radios de curvatura de los grupos de partículas registradas en las placas y que sirven para determinar su energía a partir del producto $B\rho$ mediante tablas conocidas¹⁵, siendo B la intensidad del campo magnético constante del espectrógrafo durante el experimento.

¹⁵ "Table of Charged Particle Energies vs Magnetic Field Strength x Orbit Radius". H.A. Enge, Noruega 1955 (actualmente en el M.I.T.). Estas tablas se venden al costo por el autor.

IX. MECANISMO DE LAS REACCIONES NUCLEARES

Existen fundamentalmente dos métodos para la obtención de información referente a niveles de energía de los núcleos; el de detención electromagnética (rayos γ) y el de partículas. En este capítulo se trata el mecanismo de las reacciones nucleares en que intervienen partículas, y como es natural, usando el espectrógrafo, únicamente se obtiene información respecto a reacciones en las que la partícula emergente tiene carga eléctrica.

La notación usada para este tipo de reacciones se acostumbra condensar en la siguiente forma:

$b(e,s)r.$

b = núcleo del blanco

e = partícula entrante o incidente

s = partícula saliente

r = núcleo residual

1. Obtención de las Energías de las Partículas¹⁶.

En realidad no se miden directamente las energías de las partículas provenientes de la reacción nuclear, sino que se estiman a partir de las medidas experimentales $B\rho$.

La ecuación $E = \varphi(B\rho)$ puede obtenerse en la siguiente forma¹⁷:

La ecuación conocida de Lorentz-Einstein, que determina la masa m de un cuerpo en función de su velocidad v , a partir de su masa en reposo m_0

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (7)$$

¹⁶ Tomado del "Informe de los estudios realizados por el Laboratorio de Física Nuclear de la U.N.A.M., sobre la Reacción ${}_{13}\text{Al}^{27}(d,p){}_{13}\text{Al}^{28}$ ". M. Mazari. 1955 (no publicado).

¹⁷ Del libro particular del Dr. W.W. Buechner. Pags. 33 a 35 (1954).

puede ponerse en la forma:

$$m c^2 = \sqrt{P^2 c^2 + (m_0 c^2)^2} \quad (8)$$

haciendo los cambios necesarios en la ecuación (7) mediante la sustitución del momento p por mv , llamado también cantidad de movimiento.

La energía cinética de la partícula puede expresarse por la diferencia de las energías en movimiento y en reposo del sistema.

$$E_c = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[\sqrt{1 + \frac{P^2}{m_0^2 c^2}} - 1 \right] \quad (9)$$

Por otro lado, el momento p de un ión al atravesar un campo magnético uniforme se determina por

$$p = vm = B \rho Z e \quad (10)$$

en la que Z es carga del ión, y e la carga eléctrica del electrón.

Sustituyendo (10) en (9)

$$E_c = \left[\sqrt{1 + \left(\frac{Z e \rho B}{m_0 c} \right)^2} - 1 \right] m_0 c^2 \quad (11)$$

Desarrollando esta expresión en serie y dividiendo entre e para expresar E en ev , se obtiene la ecuación $E = \varphi(B\rho)$ de la forma deseada:

$$E_c = \frac{1}{2} \frac{Z^2 e}{m_0} (B\rho)^2 - \frac{1}{8} \frac{Z^4 e^3}{m_0^3 c^2} (B\rho)^4 + \frac{1}{16} \frac{Z^6 e^5}{m_0^5 c^4} (B\rho)^6 - \frac{5}{128} \frac{Z^8 e^7}{m_0^7 c^6} (B\rho)^8 + \dots \quad (12)$$

Las unidades de esta ecuación están expresadas:

E en electrón volts; e en coulombs; m_0 , masa en reposo de la partícula en kilogramos; B en Webers/ m^2 ; y ρ en metros.

Eligiendo las unidades convenientes para expresar E en Mev y $B\rho$ en kilogauss centímetros, y sustituyendo e/m_0 por la relación conocida

$$\frac{e}{m_0} = \frac{F}{M} = \frac{9652.01 \text{ emu equiv}^{-1}}{M},$$

siendo F la constante de Faraday y M la masa de la partícula en u.a.m., se han formulado las ecuaciones que se escriben a continuación, de E vs $B\rho$ para protones ($M = 1.007594$), deuterones ($M = 2.014187$), tritones¹⁴ ($M = 3.016448$), y partículas α ($M = 4.002779$); dichas ecuaciones han permitido calcular las tablas que se emplean comúnmente en los laboratorios de física nuclear¹⁵.

$$E_p = 4.789633 \times 10^{-5} (B\rho)^2 - 1.22254 \times 10^{-12} (B\rho)^4 + 6.241 \times 10^{-20} (B\rho)^6 - 3.98 \times 10^{-27} (B\rho)^8 + \dots \quad (13)$$

$$E_d = 2.396006 \times 10^{-5} (B\rho)^2 - 1.5305 \times 10^{-13} (B\rho)^4 + 1.96 \times 10^{-21} (B\rho)^6 - \dots \quad (14)$$

$$E_t = 1.599897 \times 10^{-5} (B\rho)^2 - 4.557 \times 10^{-14} (B\rho)^4 + 2.6 \times 10^{-22} (B\rho)^6 - \dots \quad (15)$$

$$E_\alpha = 4.822654 \times 10^{-5} (B\rho)^2 - 3.1200 \times 10^{-13} (B\rho)^4 + 4.04 \times 10^{-21} (B\rho)^6 - \dots \quad (16)$$

Se ha encontrado experimentalmente en el Laboratorio de Alto Voltaje del M.I.T. (Strait, no publicado), que un punto localizado a la tercera parte de la altura, del lado de la mayor energía de un pico correspondiente a una reacción dada, empleando diferentes gruesos de blanco no cambia de posición; se ha usado este hecho para los cálculos tanto de las calibraciones efectuadas con polonio, como de los niveles de energía de las reacciones nucleares.

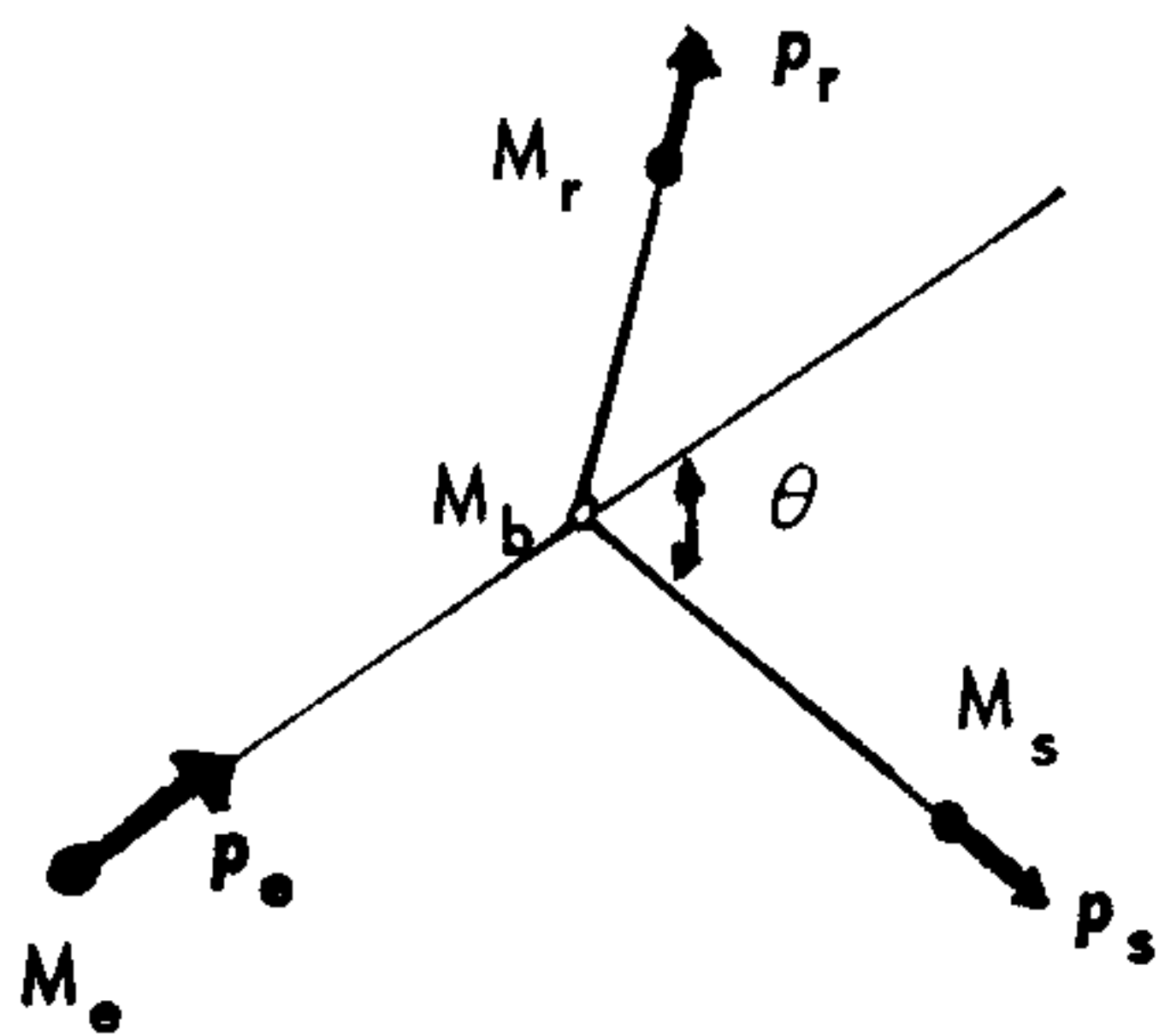
2. Ecuación Q. En el informe mencionado antes¹⁶, se despreció la corrección relativista al derivar la ecuación Q, dado que en ese ejemplo ésta era despreciable. No ocurre lo mismo tratándose de reacciones en que intervienen núcleos

muy ligeros como se verá más adelante, en el ejemplo de una reacción experimental.

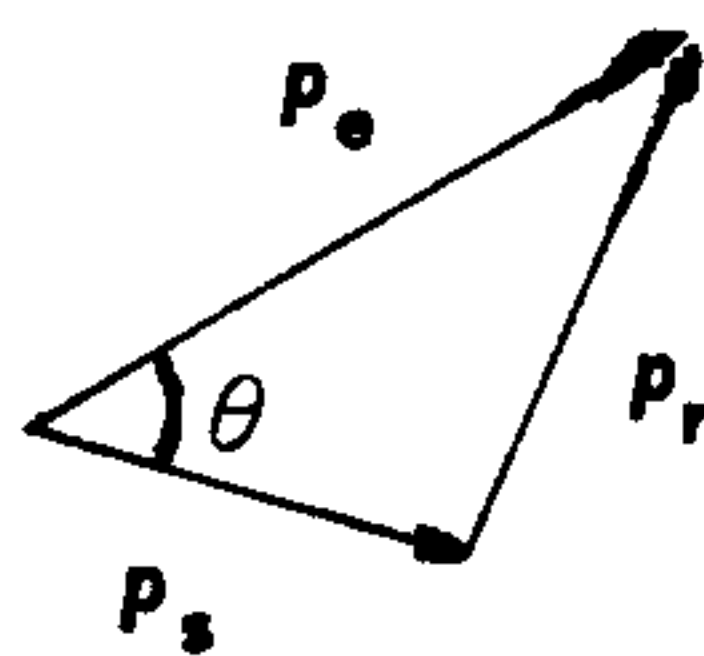
En la teoría de las reacciones nucleares¹⁹ presentada por Livingston y Bethe en 1937, se encuentran las ecuaciones que obtuvieron para calcular los valores de las energías Q liberadas o absorbidas en una reacción nuclear. Al grupo del Van de Graaff de la U.N.A.M., interesan las ecuaciones expresadas en función de energías de bombardeo y de las energías de las partículas emitidas por los núcleos al romperse. Dada una reacción del tipo de colisión de partículas (sistema del laboratorio) como el que se muestra en la figura adjunta y suponiendo que exista en esta reacción conservación de energías y momentos, se establece un sistema de ecuaciones,

$$E_e + Q = E_r + E_s \quad (17)$$

$$p_e = p_s + p_r \quad (18)$$



b = blanco
e = entrante
s = saliente
r = residual



p_i en términos de E_i y M_i queda:

$$p_i^2 = 2 M_i E_i + \frac{E_i^2}{c^2} \quad (19)$$

En el triángulo de conservación de momentos se cumple la relación

$$p_r^2 = p_e^2 + p_s^2 - 2 p_e p_s \cos \theta,$$

ecuación que expresada en términos de (19) resulta:

$$2 M_r E_r + \frac{E_r^2}{c^2} = 2 M_e E_e + \frac{E_e^2}{c^2} + 2 M_s E_s + \frac{E_s^2}{c^2} - 2 \sqrt{2 M_e E_e + \frac{E_e^2}{c^2}} \sqrt{2 M_s E_s + \frac{E_s^2}{c^2}} \cos \theta \quad (20)$$

¹⁹ "Nuclear Physics. Dynamics. Experimental" M.S. Livingston y H.A. Bethe, Rev. Mod. Phys., 9, 245 (1957).

Sustituyendo en el primer término del miembro izquierdo de la ecuación (20) a E_r por $Q + E_o - E_s$, de la ecuación (17) y despejando a Q , se obtiene directamente la ecuación (132) Pag. 669 de Bainbridge¹¹.

$$Q = \frac{M_s + M_r}{M_r} E_s - \frac{M_r - M_o}{M_r} E_o -$$

$$- 2 \frac{\sqrt{M_o E_o M_s E_s}}{M_r} \cos \theta \sqrt{1 + \frac{E_o}{2M_o c^2}} \sqrt{1 + \frac{E_s}{2M_s c^2}} +$$

$$\frac{E_o^2 + E_s^2 - E_r^2}{2M_r c^2} \dots \quad (21)$$

Desarrollando en serie el producto de los radicales y despreciando términos de orden superior.

$$\sqrt{1 + \frac{E_o}{2M_o c^2}} \sqrt{1 + \frac{E_s}{2M_s c^2}} = \left(1 + \frac{1}{4} \frac{E_s}{M_o c^2} \dots\right) \left(1 + \frac{1}{4} \frac{E_o}{M_s c^2} \dots\right) \quad (22)$$

$$= 1 + \frac{1}{4} \frac{E_o}{M_o c^2} + \frac{1}{4} \frac{E_s}{M_s c^2} + \frac{1}{16} \frac{E_o E_s}{M_o M_s c^4} + \dots \quad (22)$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (21) para separar los términos clásicos de los relativistas y sacando en los segundos $\frac{1}{2M_r c^2}$ como factor común, se obtiene la fórmula de la ecuación Q presentada por H. Enge¹⁴, Pag. 11.

$$Q = \frac{M_s + M_r}{M_r} E_s - \frac{M_r - M_o}{M_r} E_o - 2 \frac{\sqrt{M_o E_o M_s E_s}}{M_r} \cos \theta$$

$$+ \frac{1}{2M_r c^2} \left[E_o^2 + E_s^2 - E_r^2 - \sqrt{M_o E_o M_s E_s} \left(\frac{E_o}{M_o} + \frac{E_s}{M_s} \right) \cos \theta \right] \dots \quad (23)$$

H. Enge sugiere sustituir E_r , que en estos experimentos se desconoce, por el valor clásico E'_r en función de términos conocidos (24); de esta manera se tiene una aproximación aceptable para incluirse en la corrección relativista de la ecuación (23).

$$E'_r = \frac{M_e}{M_r} E_e + \frac{M_s}{M_r} E_s - 2 \frac{\sqrt{M_e E_e M_s E_s}}{M_r} \cos \theta \quad (24)$$

X. LENTE ELECTROSTATICA

Frecuentemente se pierden niveles de reacciones nucleares de muy baja intensidad cuando el fondo de partículas dispersas es alto. Para lograr una buena geometría, en particular en un espectrógrafo como el descrito, sería ideal lograr un haz de partículas concentrado en un punto sobre el blanco y sin elementos extraños que las dispersen, tales como rejillas o diafragmas. Era frecuente el uso de rejillas que limitaron el tamaño y por consiguiente, la intensidad del haz sobre el blanco (0.25 mm o menos). Elementos de este tipo dispersan partículas elásticamente, muchas de las cuales penetran en el espectrógrafo y producen un "fondo", especialmente cuando se analizan reacciones con ángulos próximos a la dirección del haz, entre 0 y 10°.

Una manera de poder eliminar las rejillas cercanas al blanco, es tratando de enfocar el haz desde una distancia lejana a él; por sugerencia del Dr. Buechner, se construyó una doble lente electrostática²⁰ diseñada por su grupo pero que todavía no había sido usada. La idea de esta doble lente consiste en producir un campo electrostático entre 4 barras cilíndricas, teniendo polaridades opuestas las barras contiguas e iguales las barras opuestas. La segunda lente se forma de la misma manera, invirtiendo las polaridades de las barras. Un haz divergente circular que pasa por el primer campo, se concentra en una dirección y se amplía en la otra; al pasar por el segundo campo, puesto que las polaridades se encuentran invertidas, se concentra en el plano en el que el primero divergía y no da tiempo al haz concen-

²⁰ "Electrostatic Strong Focusing Lens". M. Loren Bullock. Am. Journ. of Phys. 264, 1954.

trado en la dirección perpendicular a abrirse nuevamente.

Sin el empleo de la doble lente electrostática, el diámetro del haz de partículas sobre el blanco, en el Van de Graaff de la U.N.A.M., es de unos 4 mm; mediante el empleo de ese dispositivo, se obtuvo un haz horizontal de 0.4 mm × 1.5 mm, satisfaciendo las necesidades de geometría del espectrógrafo. La orientación se efectuó usando aparatos de topografía, y se comprobó con placas fotográficas, la posición correcta del punto de bombardeo sobre el blanco, en el mismo lugar donde se había colocado la fuente de partículas alfa empleadas para calibrar el espectrógrafo.

Para deuterones de 0.7 Mev y 1.4 Mev bastaron voltajes de 1300 V y 1800 V en las lentes 3 y 4, respectivamente, para lograr el enfoque mencionado. (Se llaman focos 1 y 2, a los que se encuentran antes de la entrada del tubo acelerador de la máquina).

Una vez que se efectúan en algunas exposiciones de espectros conocidos, podrá comprobarse si efectivamente el fondo se ha reducido o si este sistema no es adecuado y hay necesidad de volver a emplear rejillas frente al blanco.

XI. PRIMEROS EXPERIMENTOS

Con el objeto de establecer la norma a seguir para el estudio de reacciones en núcleos ligeros, se han intentado dos estudios sencillos:

1. Bombardeando un blanco delgado de formvar con soporte de oro evaporado, se pretendió obtener deuterones elásticamente rebotados del C^{12} , y Au^{197} con el objeto de calibrar con precisión el radio de curvatura ρ_0 del magneto deflector del equipo. Al mismo tiempo, se buscó la comprobación de que el primer nivel de excitación del O^{17} (0.875 Mev)^{21, 22} es un singulete y no un doblete distante unos 5 Kev como cree haberlo registrado el grupo de Wisconsin²³.

²¹ "(d,p) Reactions from Carbon, Nitrogen and Oxygen". A. Sperduto, W.W. Buechner, C. K. Bockelman and C.P. Browne. Phys.Rev. 96, 1316 (1954).

²² "Energy Levels of Light Nuclei V". F. Ajzenberg y T. Lauritsen. Rev.Mod. Phys. 27, 77, (1955).

²³ Comunicación privada del Dr. W.W. Buechner con este Laboratorio. Sept. 1956.

Para verificar la forma y anchura del primer estado excitado del O^{17} se efectuaron cuatro exposiciones, tres a 90° y una a 45° . Poniendo el equipo en condiciones rigurosas de estabilidad y ángulos sólidos de aceptación bajos, fue posible obtener picos de la forma como el que se muestra en la Fig. 19. Aunque este pico puede considerarse bastante intenso, aún así su semianchura es sólo de 5.4 Kev. De haber dos picos distantes unos 5 Kev y no poderlos resolver, la semianchura de ellos sería por lo menos de unos 10 Kev, cosa que no ha sido observada. A la cola del pico no se le atribuye importancia, ya que dicha forma ocurre siempre en la zona correspondiente a la cámara fotográfica en que éste fue obtenido, igual que los picos producidos por las partículas alfa monoenergéticas del Po^{210} empleadas durante la calibración del espectrógrafo. No se notó en el espectro del O^{17} un aumento relativo respecto al nivel excitado de un pico que se levantara cercano a la cola, en las varias exposiciones efectuadas a distintos ángulos.

Puede concluirse de estas observaciones que el primer estado excitado del O^{17} es efectivamente un singulete.

2. El grupo de este Laboratorio está especialmente interesado en la determinación precisa de las energías de los neutrones rápidos que emplea para la medición de secciones totales de metales²⁴. Con tal objeto, y considerando a la siguiente reacción de interés general, se ha medido con el nuevo espectrógrafo la energía Q liberada en la reacción nuclear $T(d, \alpha)n$. Para cálculos se han tomado en cuenta las correcciones relativistas, las que no resultan despreciables en esta reacción. De varias exposiciones a 90° , 80° , 60° respecto a la dirección del haz y comprobando la energía de las partículas incidentes por dispersión elástica de los proyectiles en sustancias conocidas, el valor medio Q de la reacción nuclear mencionada resultó de

$$Q = 17.580 \text{ Mev} \pm 0.025 \text{ Mev}$$

la corrección relativista al valor Q clásico fue en promedio de 104 Kev, calculada con las ecuaciones deducidas en el capítulo anterior. Se espera obtener un valor

²⁴ "Determinación de Secciones Totales con Neutrones de Energías Comprendidas entre 13.0 y 16.2 Mev". M. Mazari, F. Alba, V. Serment, Anales del Instituto de Física 1, 69, (1955) Phys.Rev. 100, 972 (1955). Rev. Mex. de Fís. 4, 165, (1955).

más exacto en cuanto se consiga un blanco delgado de tritio. El de que se disponía, medía unos 40 Kev, lo que hizo que la resolución fuera baja.

XII. COSTO

El costo neto del espectrógrafo, tomando en cuenta las partidas de materiales mecánico y eléctrico, equipo de vacío y plataforma de apoyo, asciende a \$ 102,000.00. Una estimación de los costos de dibujo y manode obra arroja un monto de \$ 92,000.00. El total resulta 62% arriba del presupuesto presentado en el proyecto original, en el que no había sido considerada la mano de obra del equipo electrónico, ni el dibujo.

No se ha tomado en cuenta en esta estimación el costo de la herramienta y equipo mecánico y electrónico necesarios para la construcción del espectrógrafo, ya que esto queda como patrimonio del Instituto. Tampoco han sido incluidos los honorarios del personal técnico que estuvo a cargo del proyecto, el que dedicaba la mayor parte del tiempo a otros trabajos dentro del Laboratorio.

XIII. AGRADECIMIENTOS

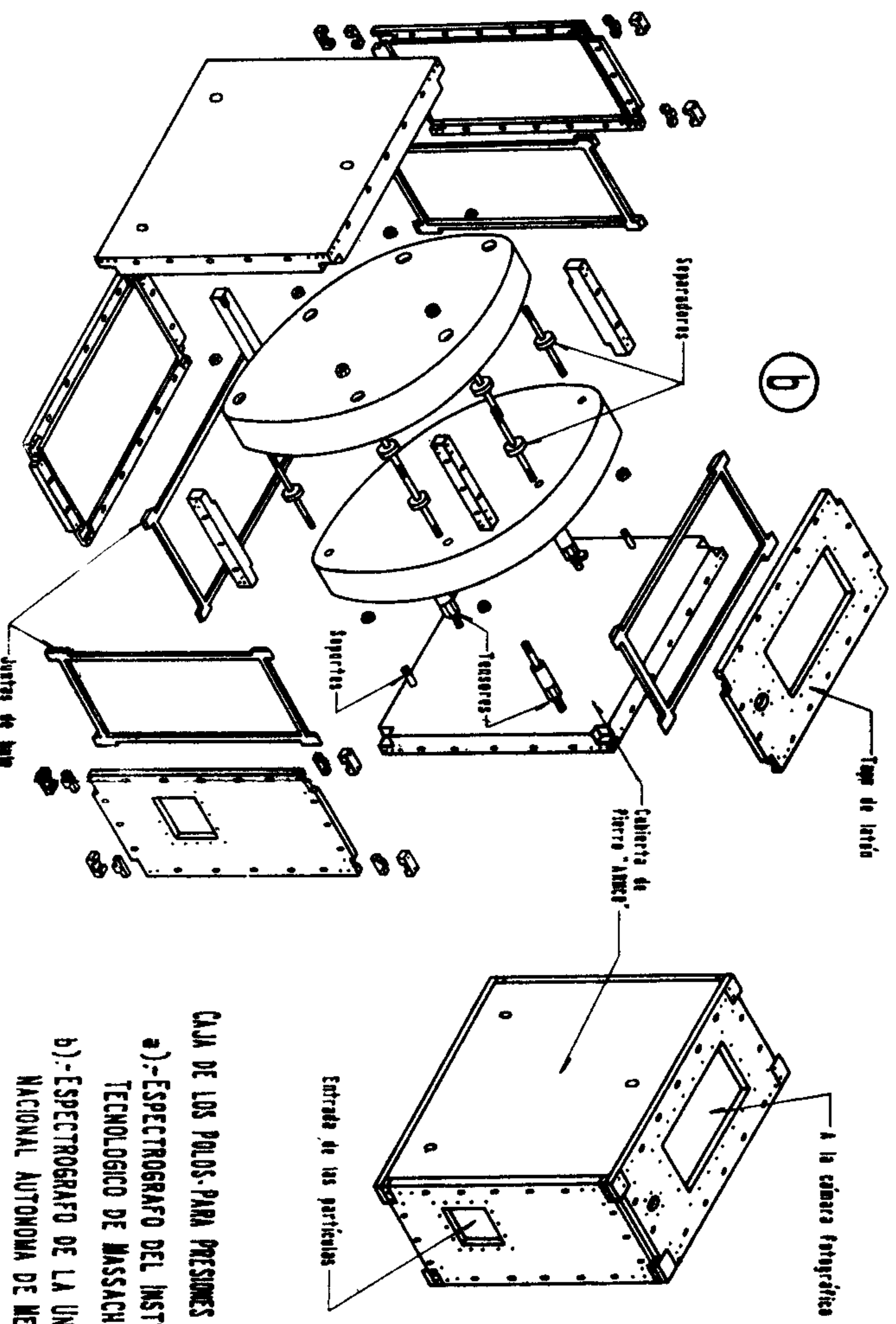
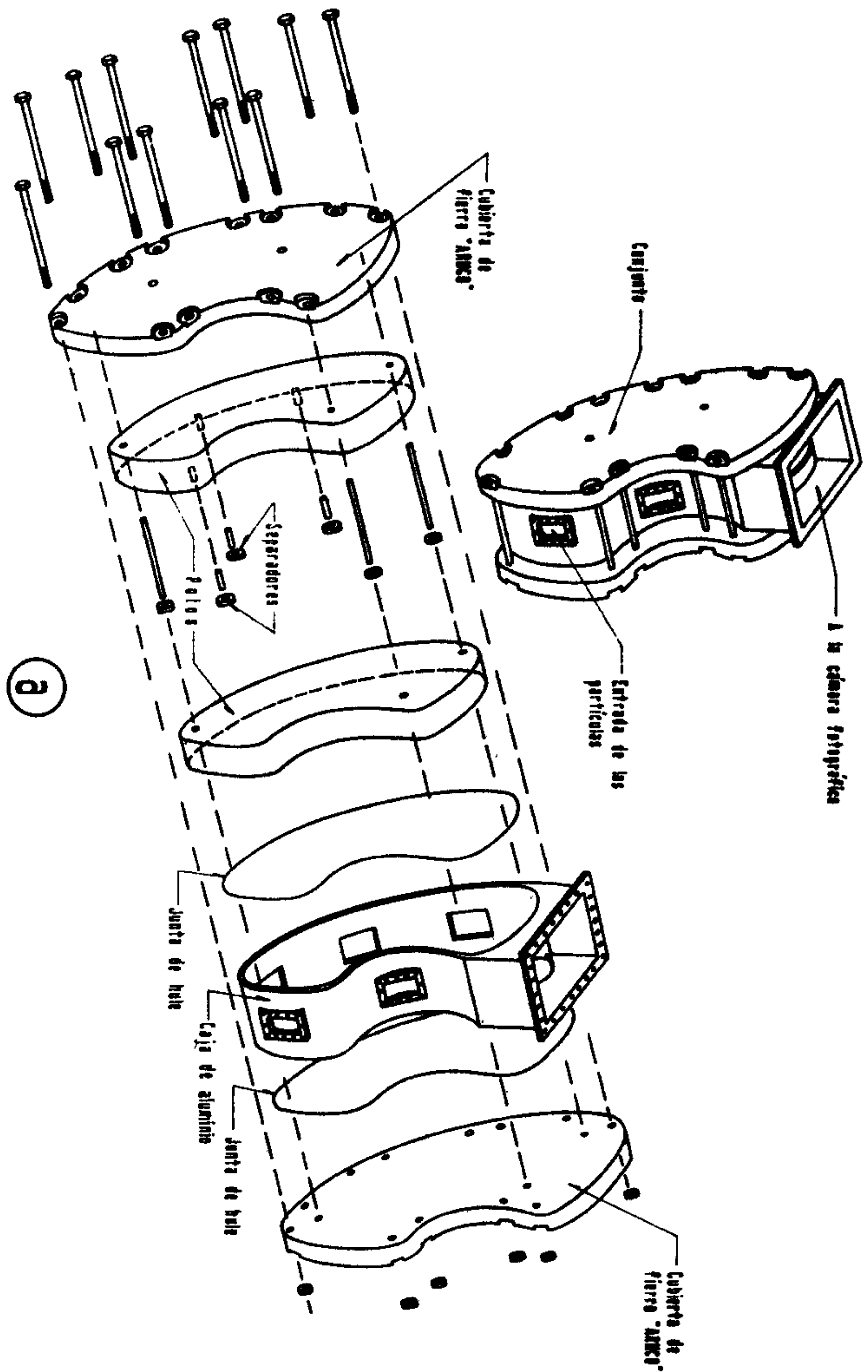
Fué posible la realización de este proyecto gracias al apoyo entusiasta de los Doctores Nabor Carrillo, Rector de la U.N.A.M., Carlos Graef Fernandez, Director del Instituto de Física y Alberto Barajas, Director de la Facultad de Ciencias. A ellos también se debe la estancia en México, en sus períodos de vacaciones, del Dr. William W. Buechner, Director del Laboratorio de Alto Voltaje del Instituto Tecnológico de Massachusetts.

La ayuda del Dr. Buechner fue extraordinaria. Sugirió la construcción en México de un espectrógrafo similar al originalmente diseñado por su grupo, y ayudó constantemente a resolver los problemas técnicos que se presentaban durante el desarrollo del proyecto. Pudieron hacerse varios estudios de reacciones nucleares en colaboración con el M.I.T., empleando placas obtenidas en dicho Instituto, tales como $Al^{27}(d,p)Al^{28}$, $Mn^{55}(p,p')Mn^{55}$ y $Co^{59}(p,p')Co^{59}$.

Se recibió ayuda desinteresada en muchas fases de la construcción del espectrógrafo; de la firma Ingenieros Civiles Asociados, que preside el Ing. Bernardo Quintana, especialmente a través de su Laboratorio de Mecánica de Suelos; del Instituto de Ingeniería, bajo la dirección del Ing. Fernando Hiriart; del Dr. Guillermo Haro, Director del Observatorio de Tonantzintla; de los Ings. Eduardo Díaz Losada y Tomás Brody; de Estructuras y Cimentaciones S. A.; de Pozos y Sondeos, S.A. y del grupo del Laboratorio de Alto Voltaje del M.I.T.

El personal que más se distinguió durante la construcción del espectrógrafo lo componen, Luis Velázquez, Teodoro Trejo, Antonio Villalpando y Gilberto López. Fué sin embargo muy valiosa la ayuda de Indalecio Gómez, Juan Velázquez, Luis Soto, Hiram Galvan, Jorge Dorantes, Pedro Ahuactzin, y el grupo de mecánicos de Industria Eléctrica de México y Talleres Arias. La parte administrativa estuvo a cargo de las señoritas De Madrid y De Pavía y de Eduardo Tirado.

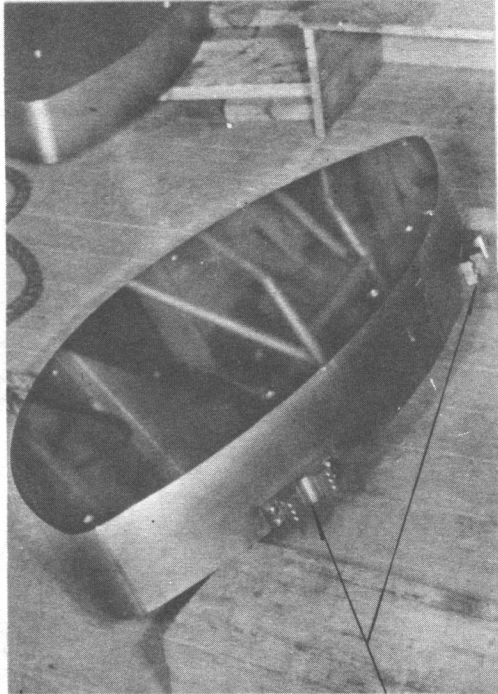
Esta página está intencionalmente en blanco



CAJA DE LOS POLOS, PARA PRESIONES DE 10^{-4} mm Hg.

a).- ESPECTROGRAFO DEL INSTITUTO
TECNOLOGICO DE MASSACHUSETTS

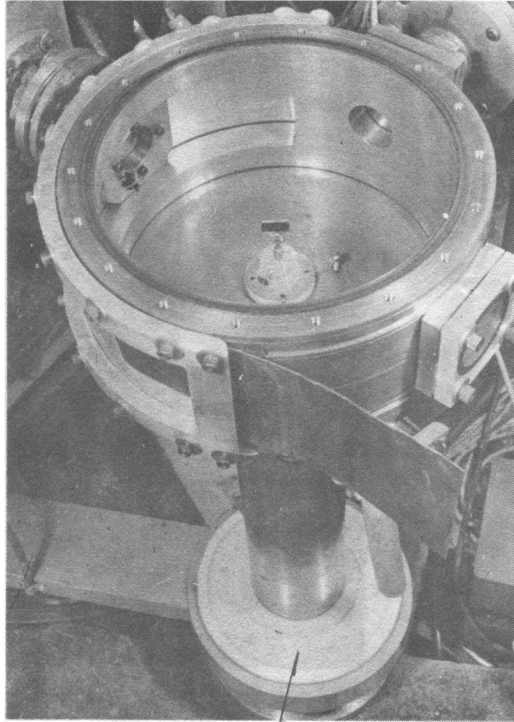
b).- ESPECTROGRAFO DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



Soportes

POLOS PARA EL CAMPO MAGNETICO PULIDOS A ESPEJO
(MAQUINACION A 0.0001")

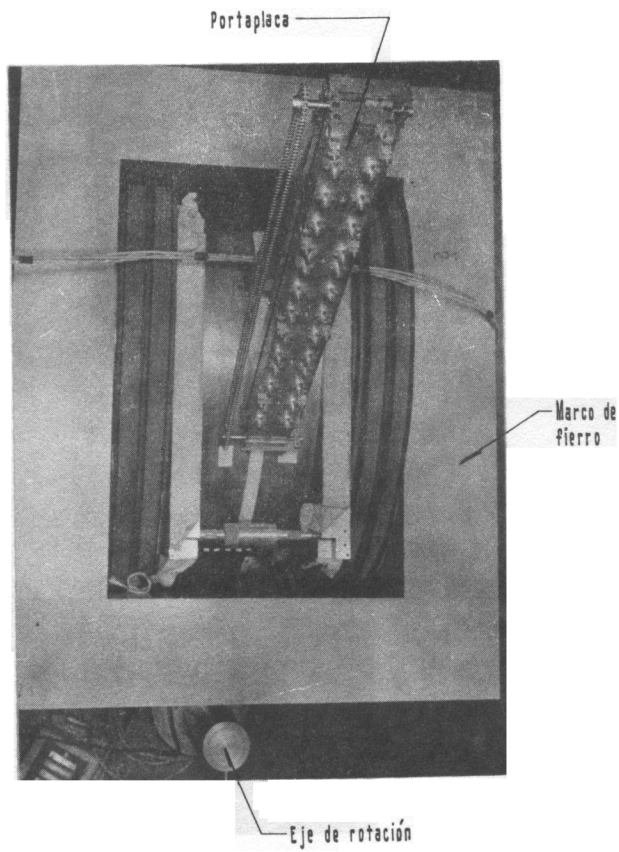
Fig. 2



Transportador

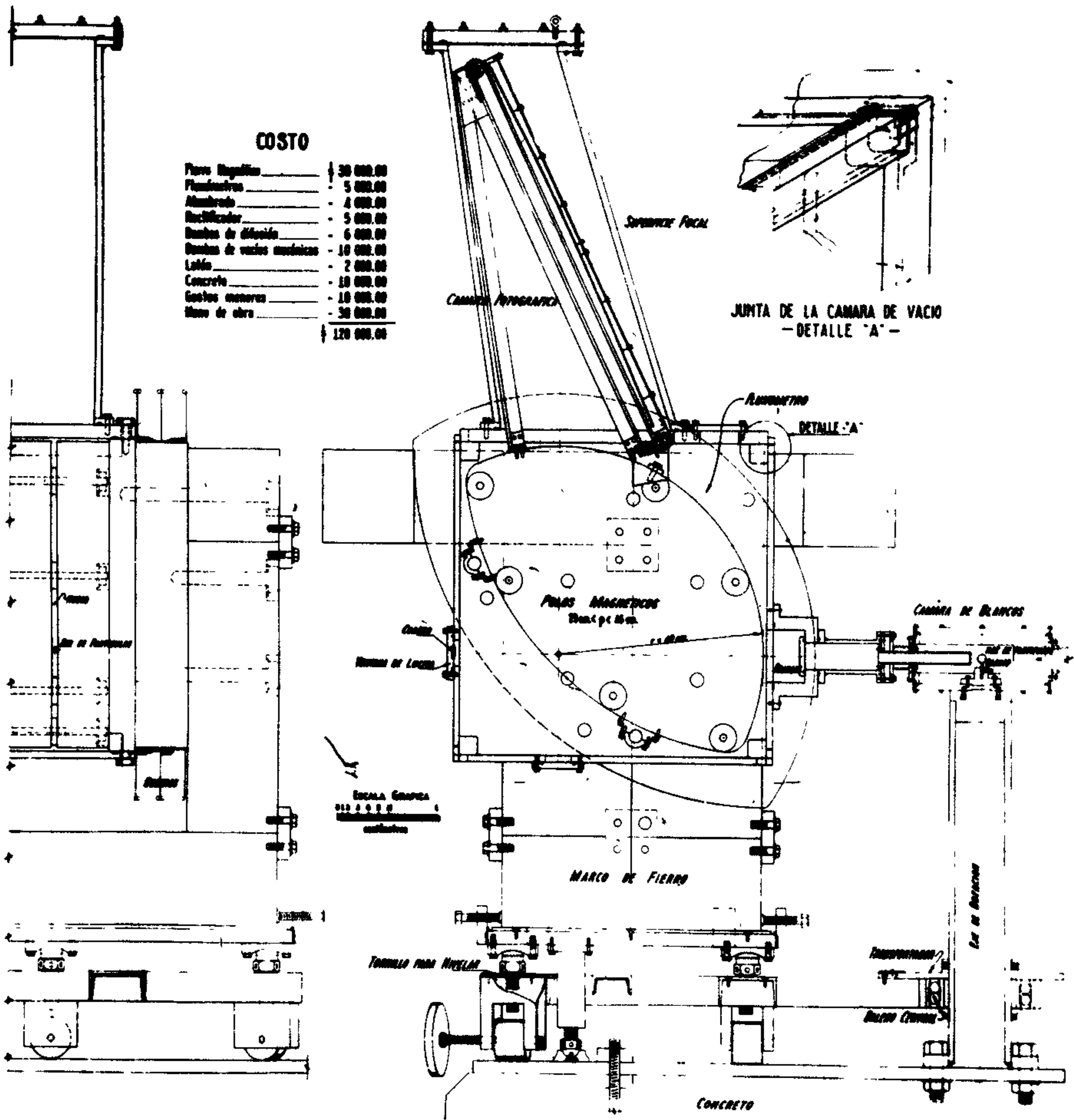
CAMARA DE BLANCOS

Fig. 3



CAMARA FOTOGRAFICA DESCUBIERTA

FIG. 4



PROYECTO DE UN ESPECTROGRAFO MAGNETICO DE MASAS PARA ESTUDIOS NUCLEARES

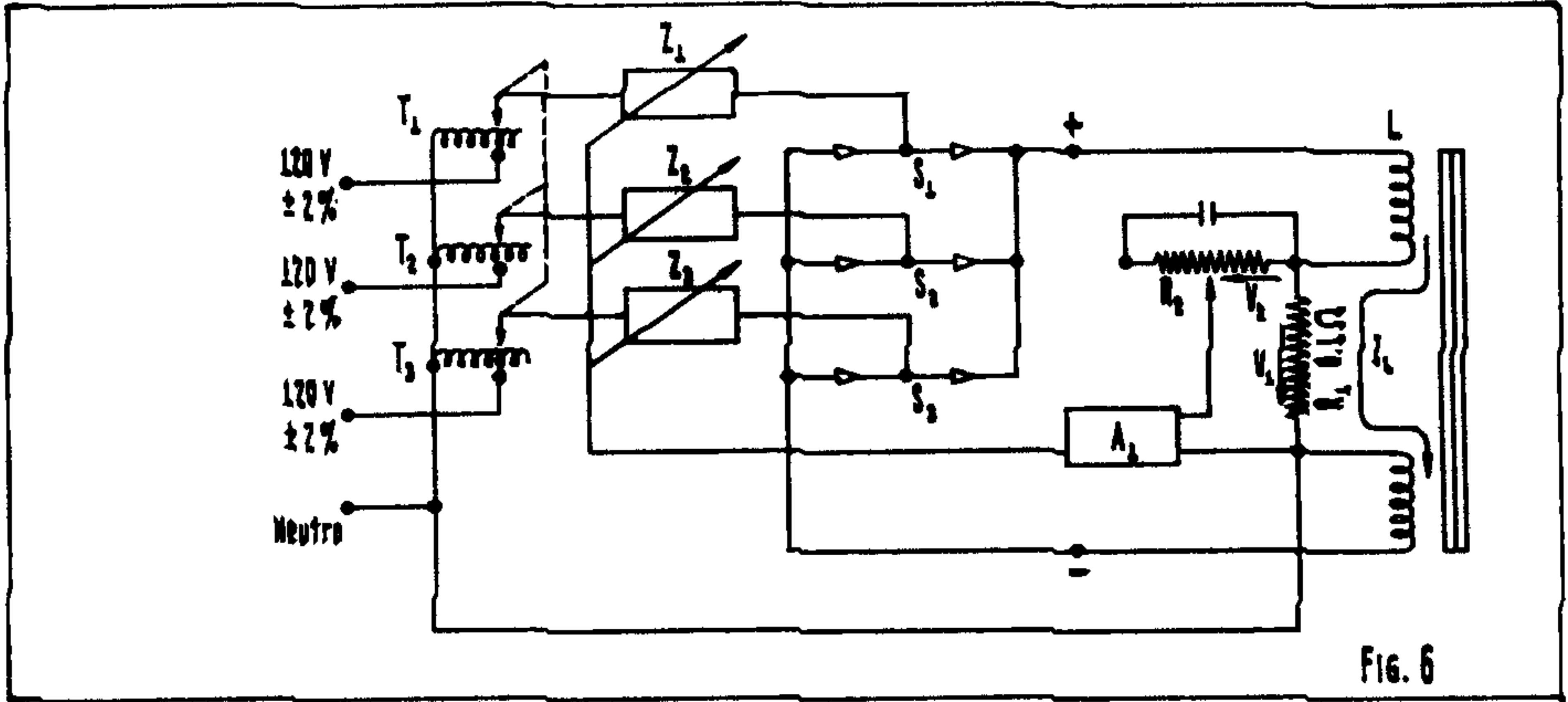
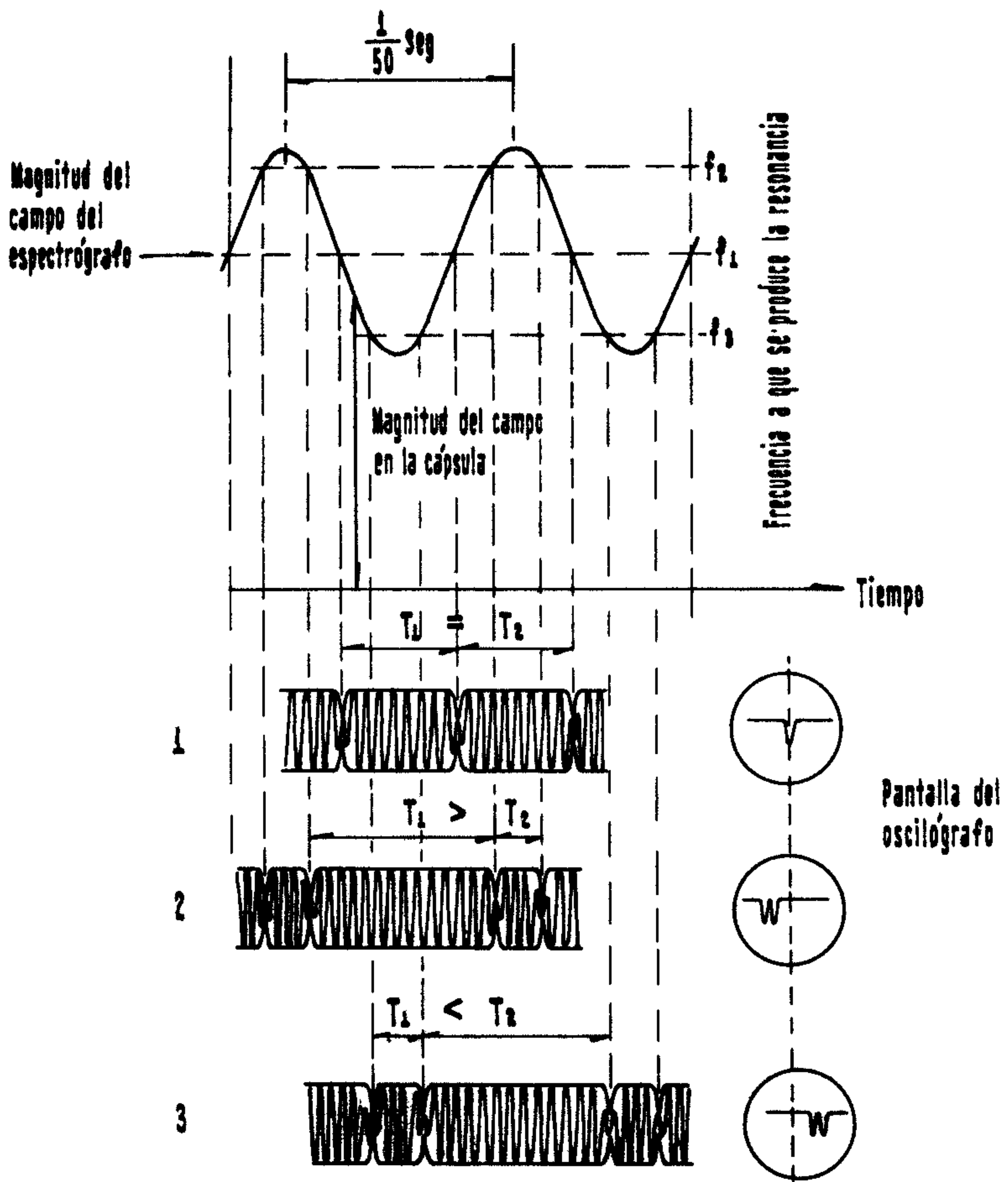


FIG. 6



OBTENCION DE LA RESONANCIA MAGNETICA NUCLEAR

FIG. 7

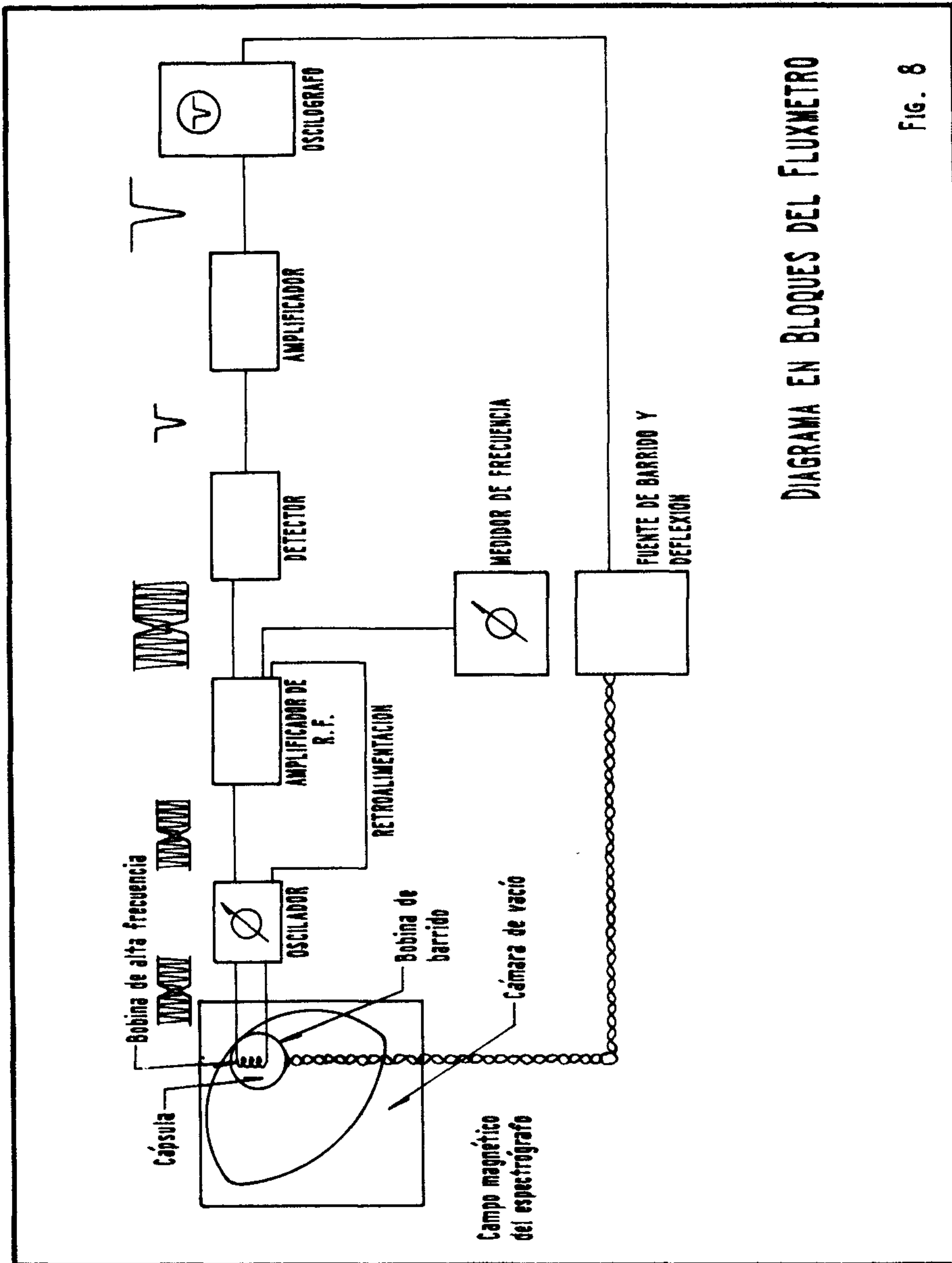
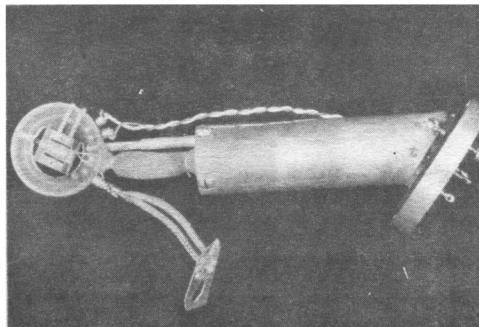


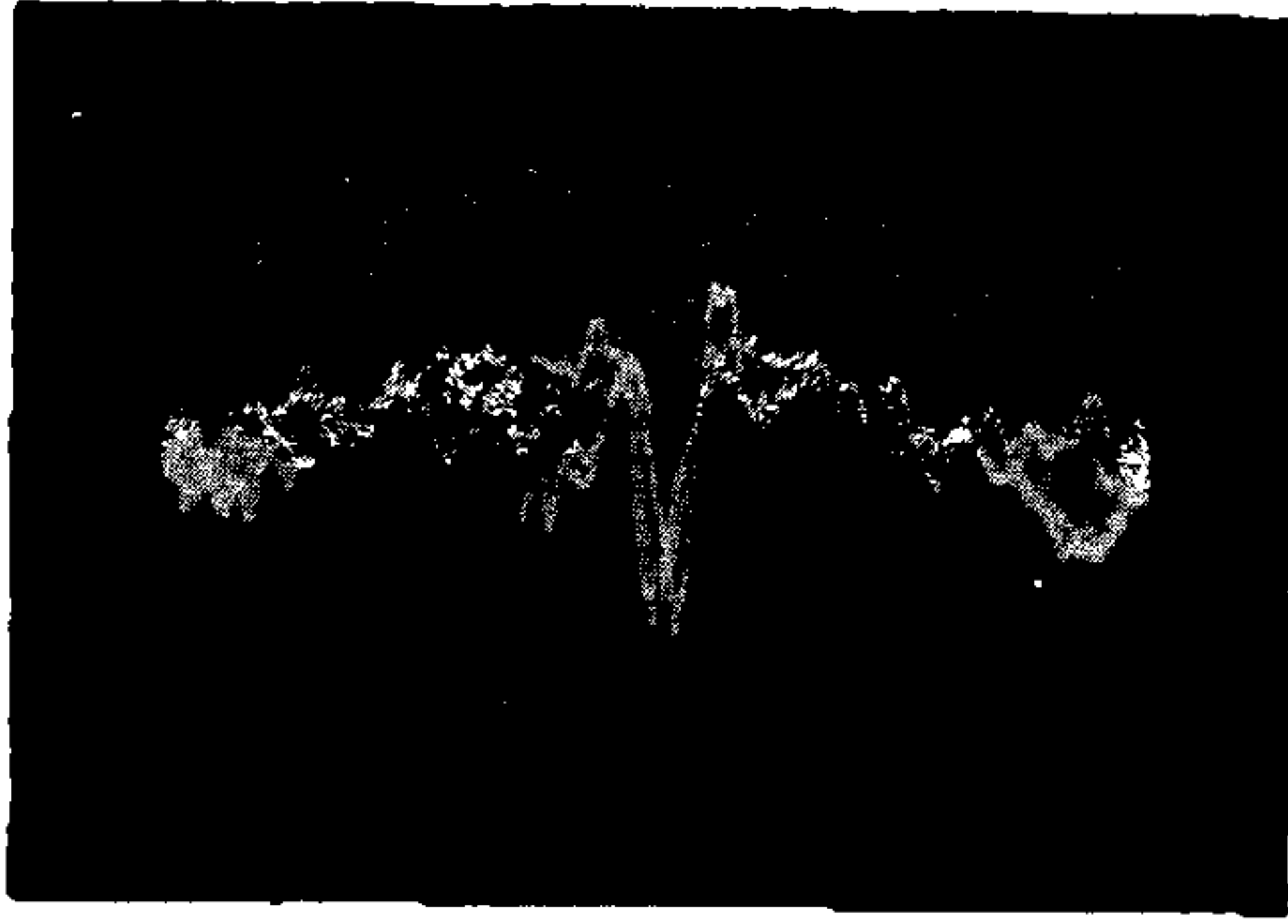
DIAGRAMA EN BLOQUES DEL FLUXMETRO

FIG. 8

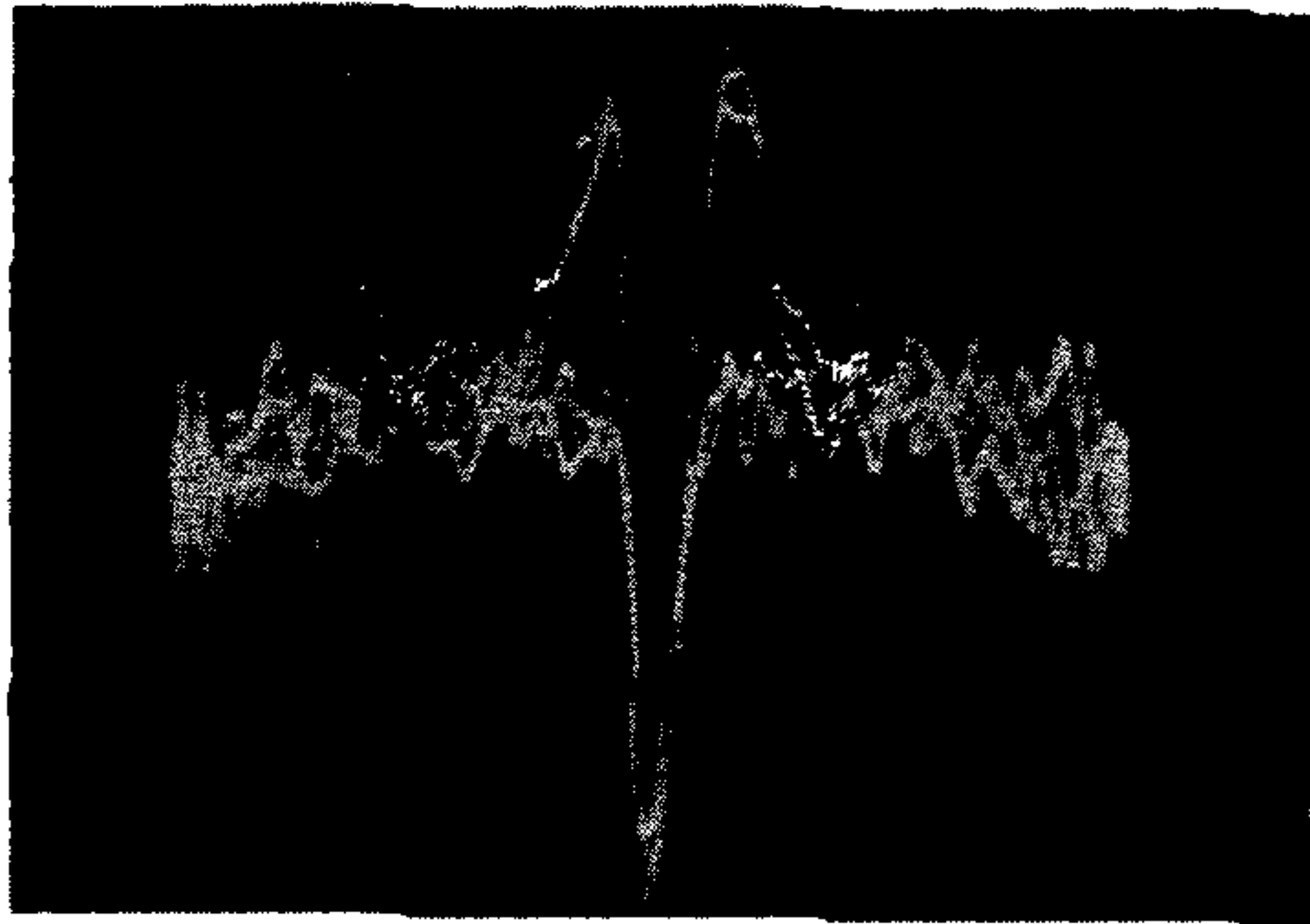


SONDA DEL FLUXMETRO.

FIG. 9

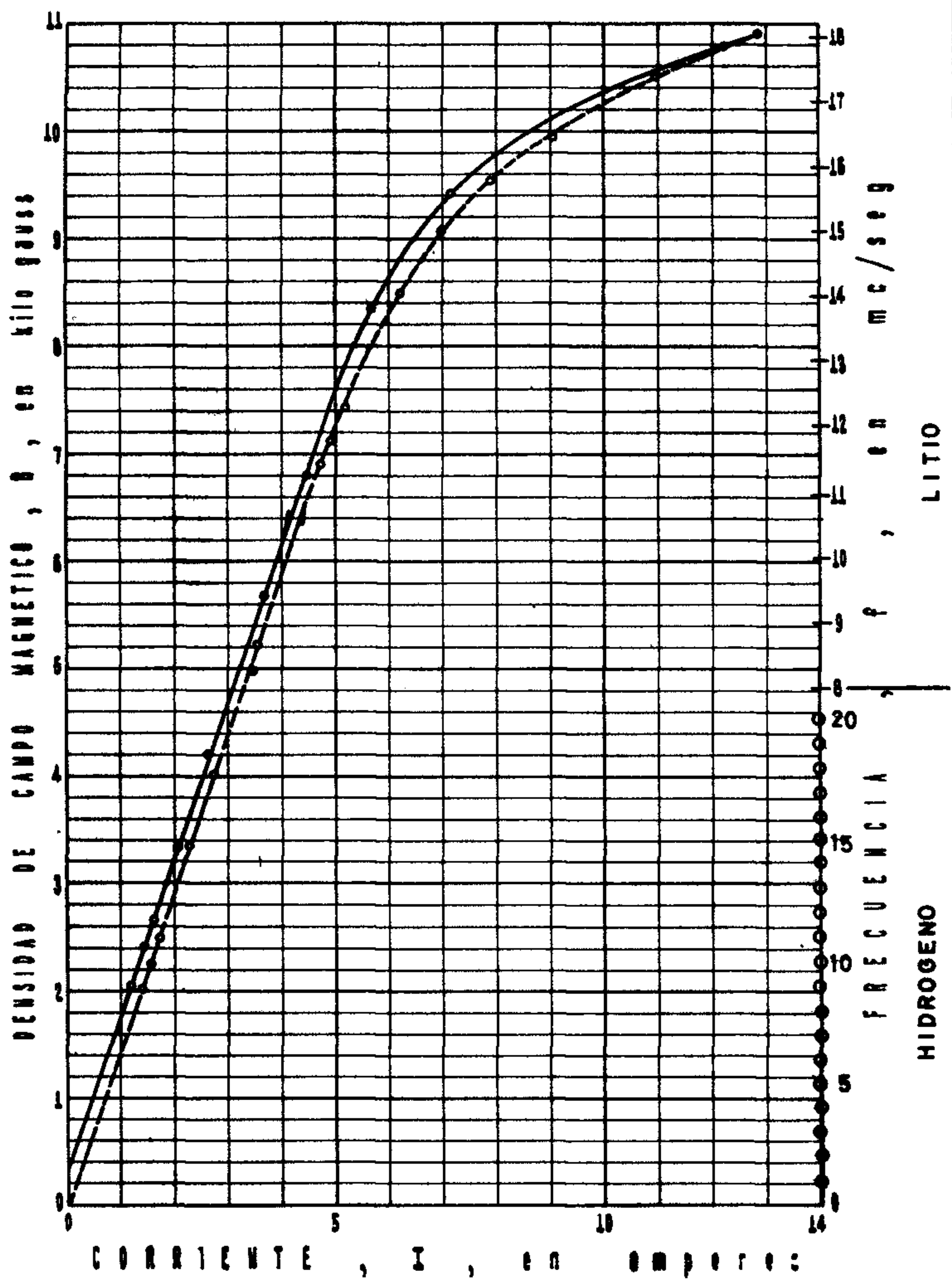


a).- Señal del Litio

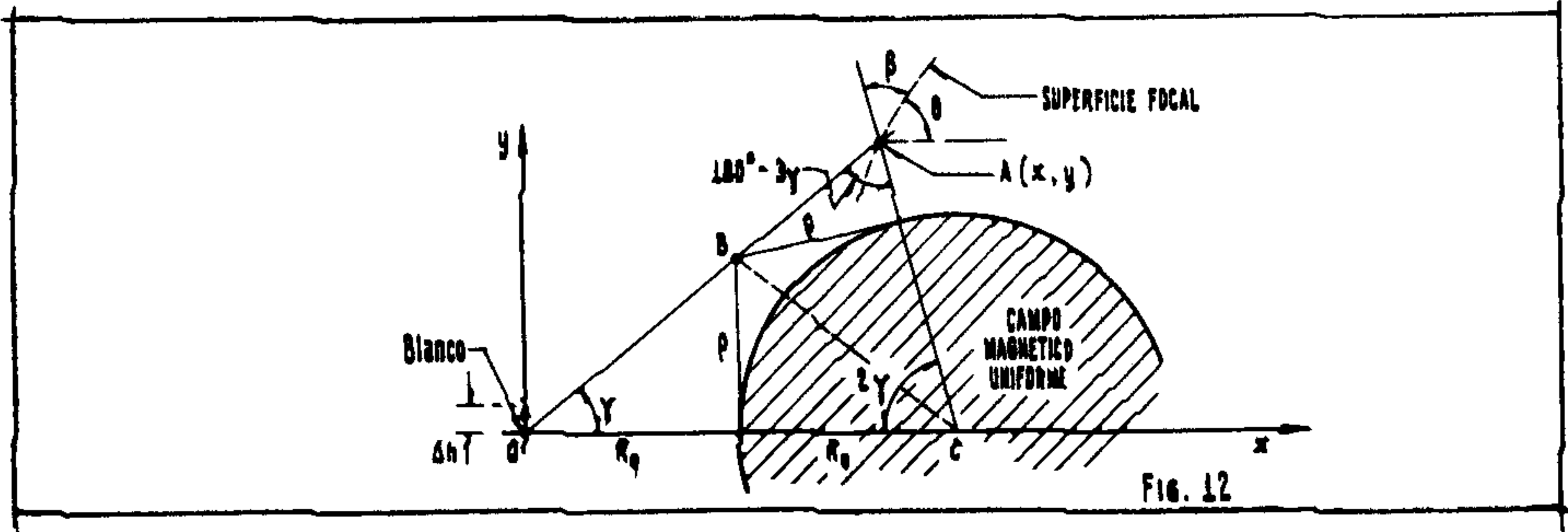


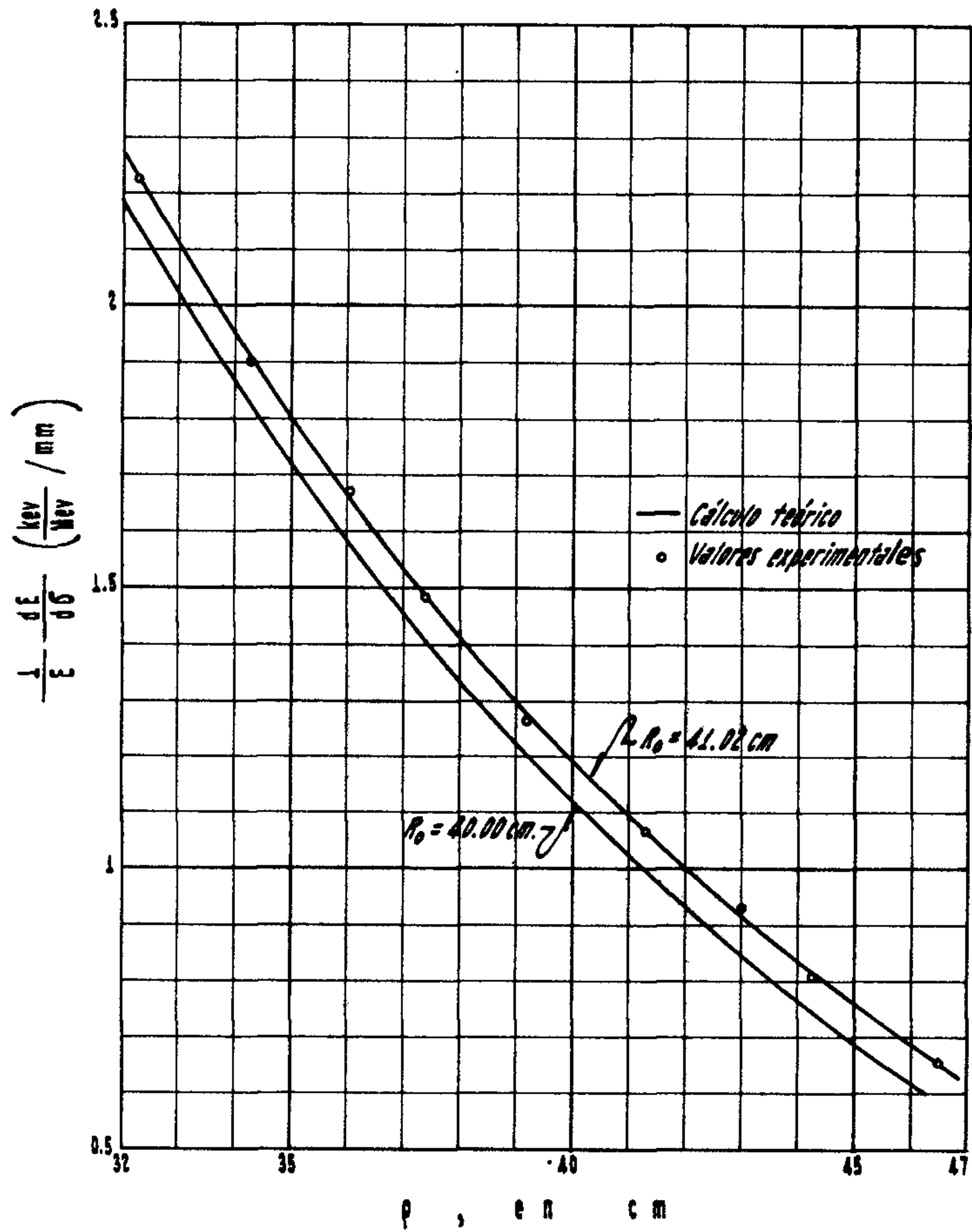
b).- Señal del Hidrógeno

FIG. 10



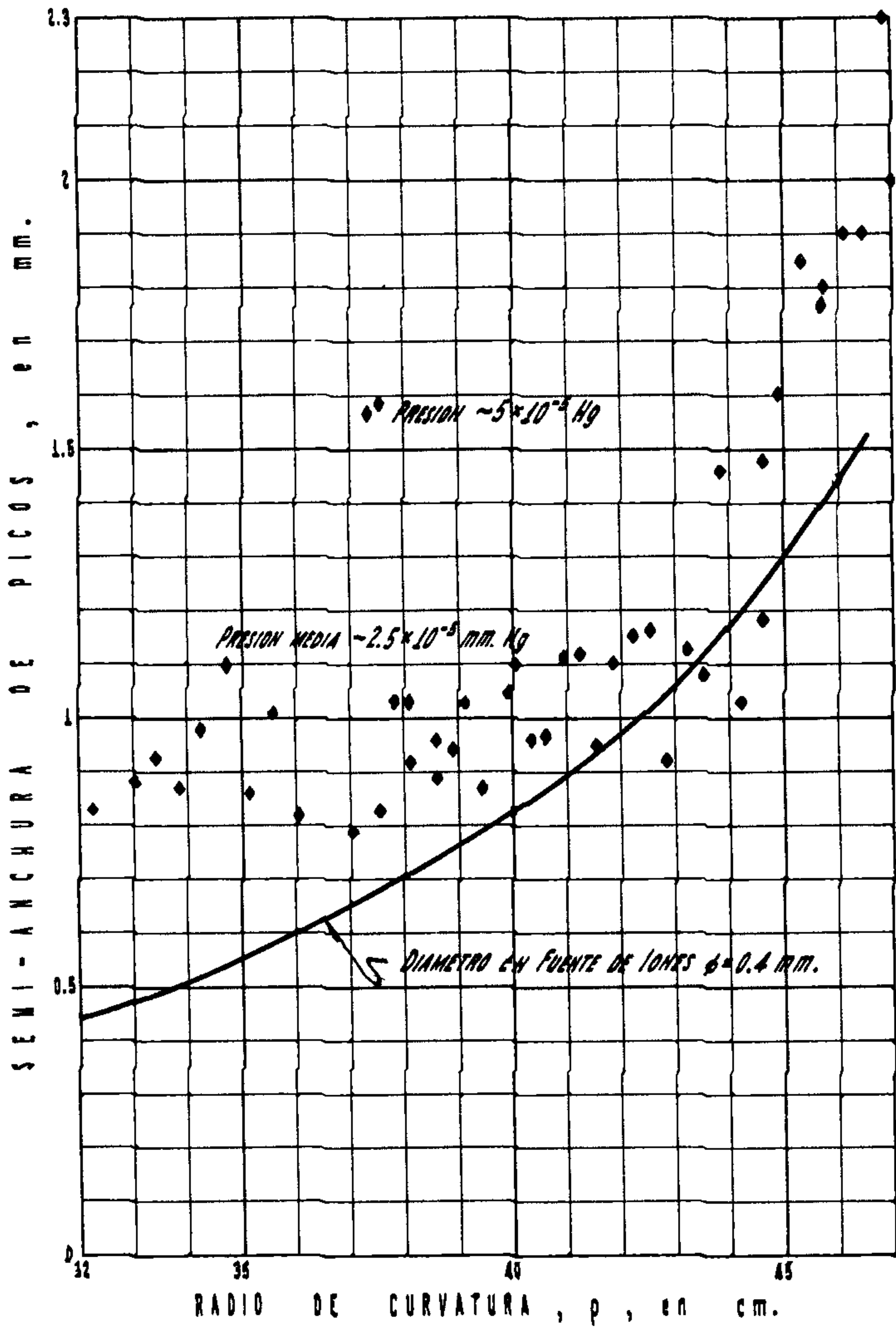
CURVA TIPICA DEL CAMPO MAGNETICO DEL ESPECTROGRAFO , I vs B Y f
 FIG. 11





DISPERSION DEL ESPECTROGRAFO

FIG. 13



AMPLIFICACION. COMPARACION ENTRE LA TEORIA (CURVA LLENA) Y EL EXPERIMENTO (ROMBOS)

FIG. 14

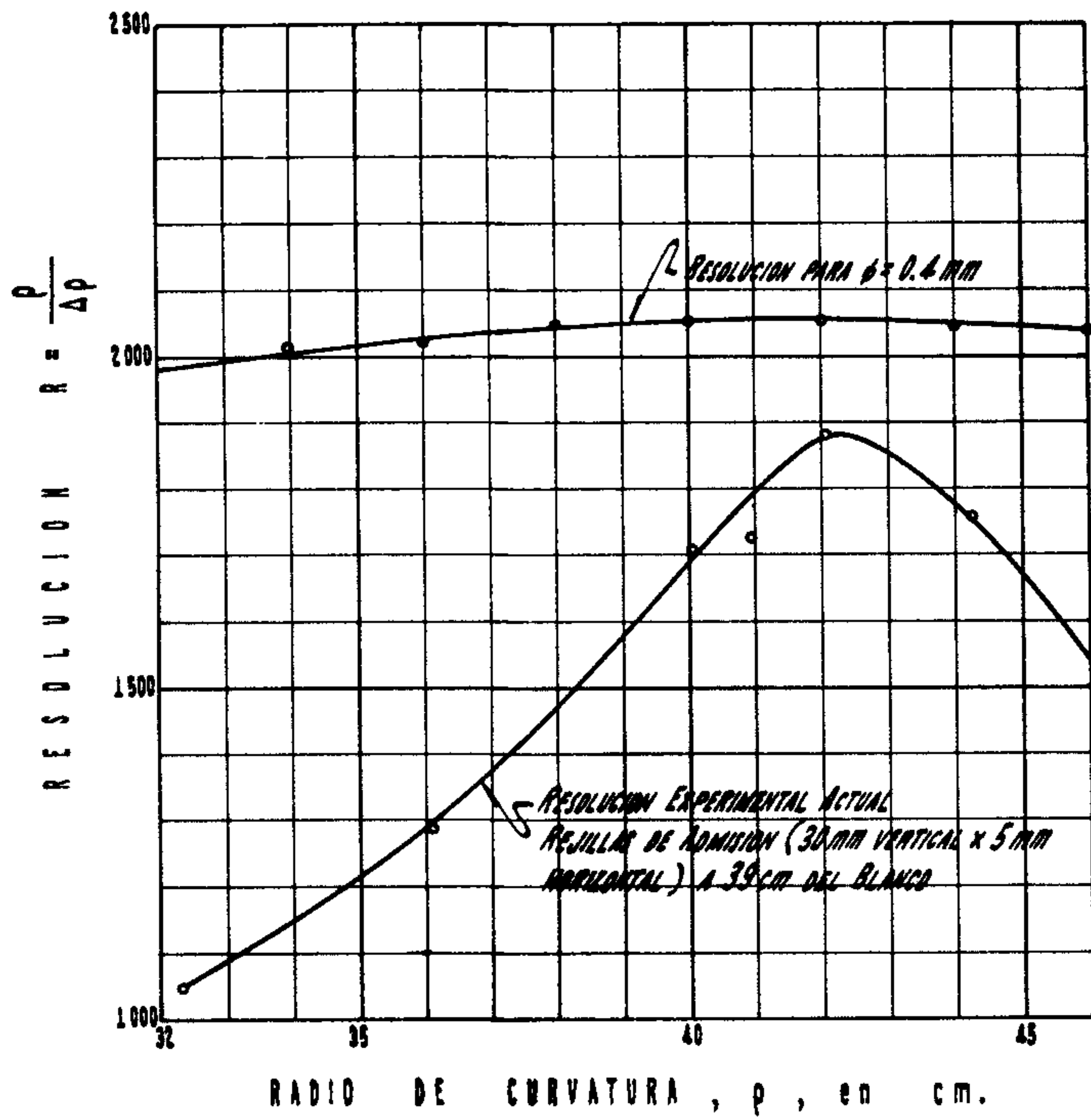
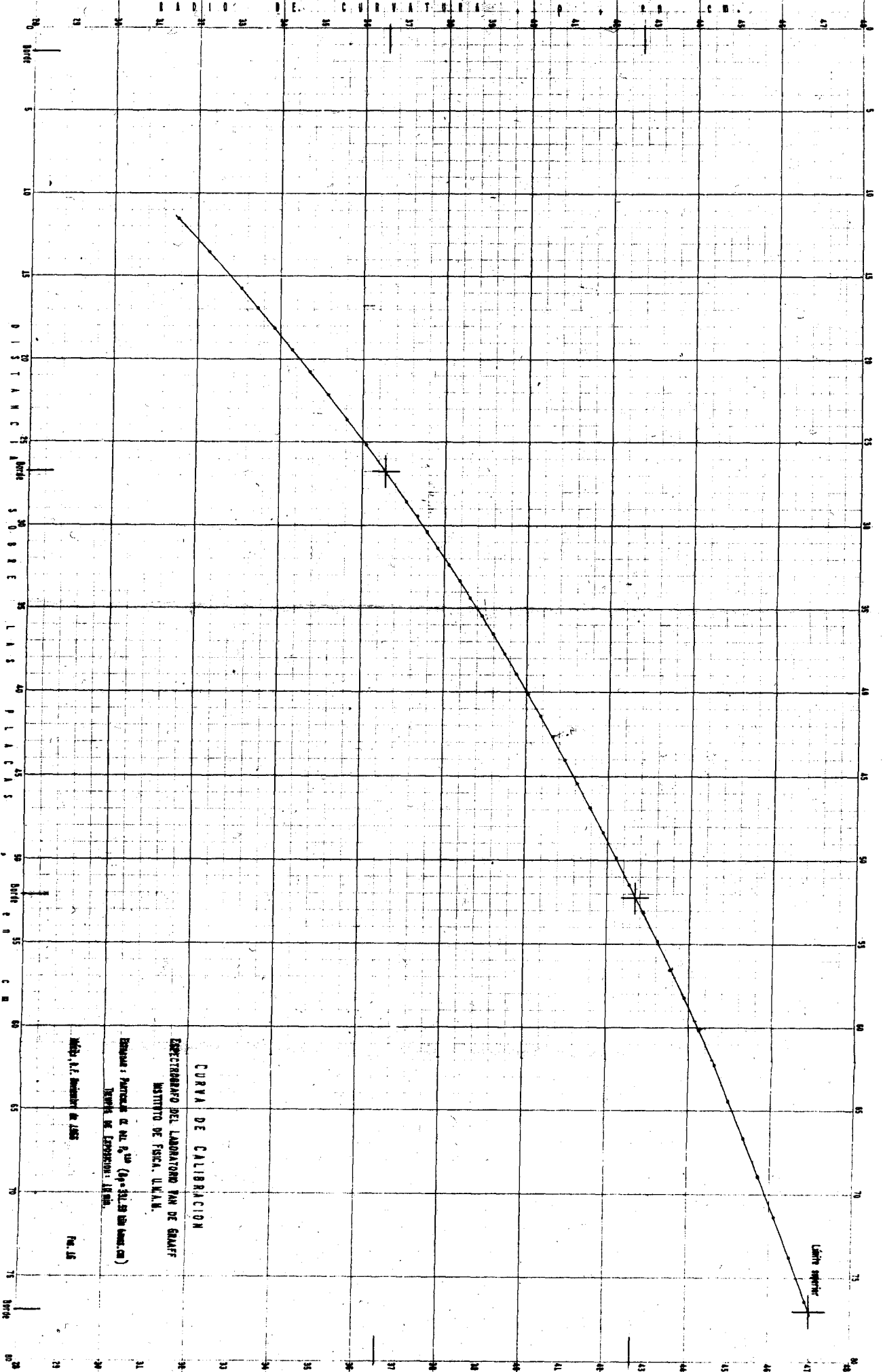


FIG. 15

Esta página está intencionalmente en blanco



CURVA DE CALIBRACION

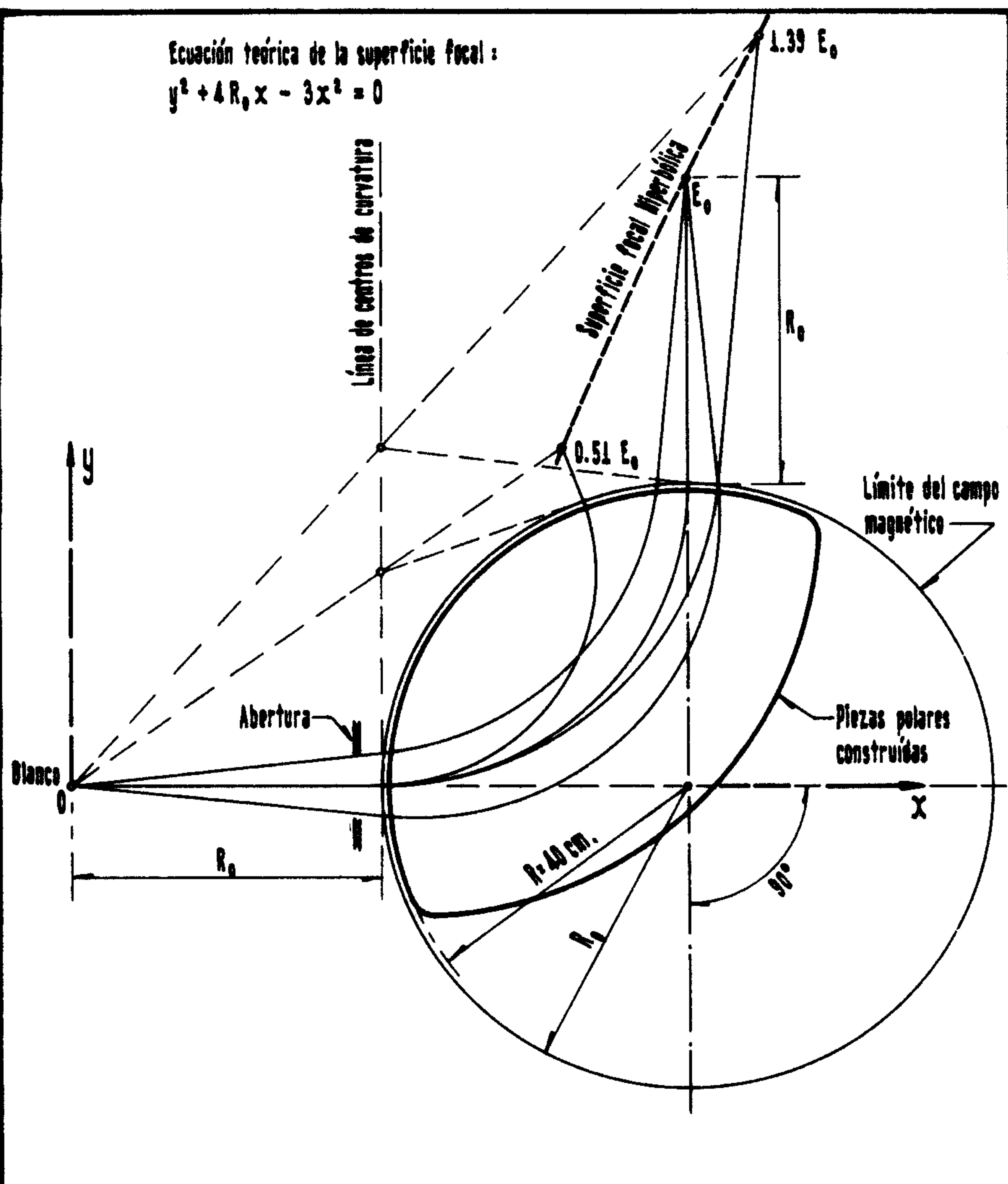
DIRECTORADO DEL LABORATORIO PAN DE AZÚCAR
 INSTITUTO DE FISICA, U.N.A.M.

Temas: Partícula de α (aproximadamente 4.0 MeV)
 Tema de Experiencia: I.F. 101

México, D.F. Noviembre de 1965

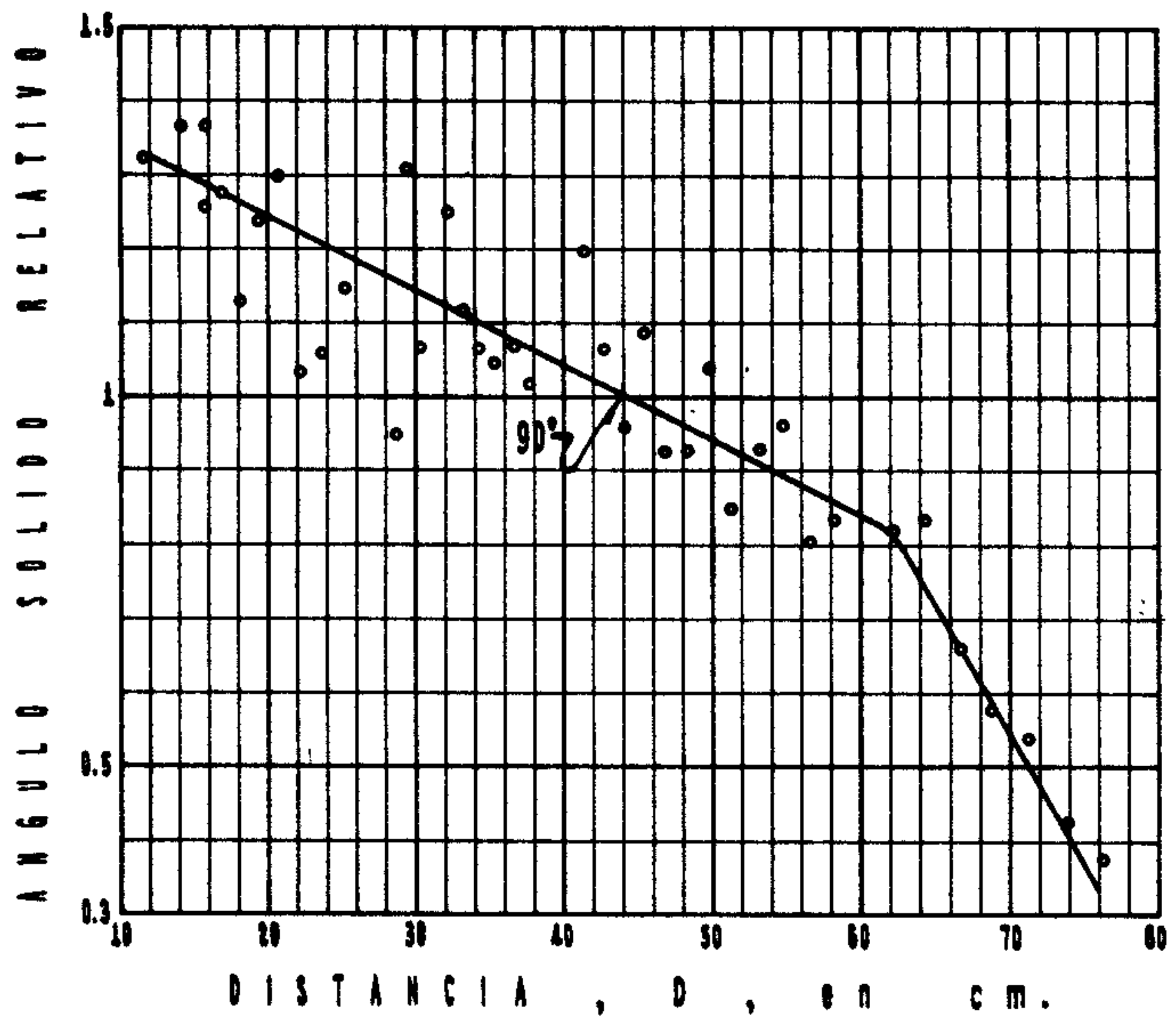
Pág. 16

Leído repetido



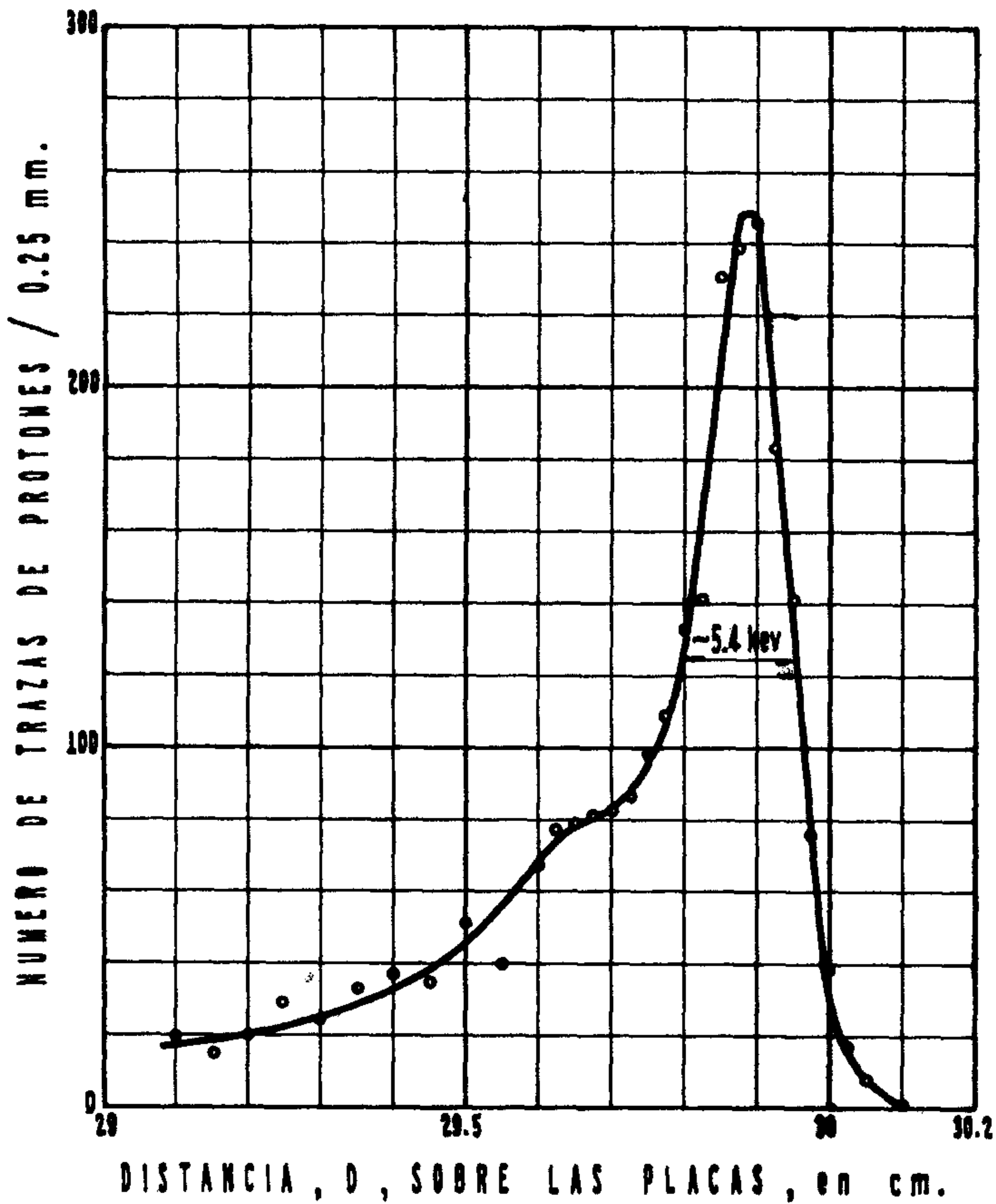
ENFOQUE DE PARTICULAS CARGADAS POR EFECTO
 DE UN CAMPO MAGNETICO CIRCULAR UNIFORME
 ESPECTROGRAFO DEL LABORATORIO VAN DE GRAAFF DE LA U. N. A. M.

FIG. 17



VARIACION DEL ANGULO SOLIDO
CON LA DISTANCIA SOBRE LAS PLACAS

Fig. 18



Blanco, Formvar con Oro Evaporado
 Reacción; $D^{16}(d,p)O^{17}$, (0.875 Mev)
 Anchura Media 1.6 mm (5.4 keV)
 $E_d = 1.582$ Mev, $E_p = 1.584$ Mev
 $\theta_{lab.} = 90^\circ$ Exp. = 1421 μC

PRIMER ESTADO EXCITADO DEL O^{17}

Fig. 19