

UN MONOCROMADOR DE FOTONES PARA LA RADIACION DE
"BREMSSTRAHLUNG" DEL BETATRON*

J. Goldemberg

Departamento de Física, Facultad de Filosofía, Ciencias y Letras,
Universidad de Sao Paulo, Brasil.

(Entregado: Agosto 18, 1956)

RESUMEN

A new instrument was developed in order to sort out monochromatic X rays of high energy from the continuous Bremsstrahlung spectrum of a 22 MeV Betatron; the resolution of the instrument was of the order of 2%. Measurements were made of total electronic absorption coefficient in carbon in the energy interval 14.5-16.5 MeV; a good agreement with theory was obtained.

I. INTRODUCCION

La idea de monocromatizar la radiación de "Bremsstrahlung" del Betatron ha sido sugerida en diversas ocasiones como una posibilidad muy atrayente. Esencialmente la idea consiste en identificar el electrón que produce un determinado fotón en el espectro continuo. Como la energía del electrón que irradia se distribuye entre el fotón emitido y el propio electrón en el proceso "Bremsstrahlung", la identificación del fotón es unívoca. Esta identificación puede ser hecha por circuitos electrónicos convenientes que hacen uso de la circunstancia de que el electrón y el fotón son simultáneos (Fig. 1).

Un primer experimento fué hecho por Koch¹ en la Universidad de Illinois de

* Un resumen de este trabajo fué publicado en Phys.Rev. 93, 1426, (1954).

una manera muy primitiva, a fin de verificar únicamente las posibilidades de registrar coincidencias entre fotones y electrones.

Recientemente Weyl y McDaniel², de la Universidad de Cornell, aplicaron la misma idea a un Sincrotrón de 300 MeV. La resolución de energía obtenida por Weyl y McDaniel, por decir así, la banda de energía de los fotones identificados era de 10% aproximadamente, o sea de 30 MeV.

El autor aplicó el principio de monocromatización del espectro de "Bremsstrahlung" en el Betatrón de 22 MeV de la Universidad de Illinois. Se hicieron esfuerzos a fin de obtener una resolución de 2% en la banda de energía de los fotones. Con esa resolución el instrumento fué aplicado en la medida del coeficiente de absorción electrónico de rayos gamma monocromáticos, en el carbono, en una energía de aproximadamente 15 millones de electrón volts.

II EL METODO EXPERIMENTAL.

Un diagrama general del método experimental utilizado puede verse en la Fig. 2. La corriente del Betatrón de 22 MeV de la Universidad de Illinois fué extraída de la cámara aceleradora por medio de un extractor magnético ("peeler"). Este extractor estaba constituido por una estructura de fierro laminado de 10 centímetros de longitud y 0.7 centímetros de altura con un canal de 1.75 milímetros por 5 milímetros excavado en la estructura, en el lado del "peeler" más próximo de la órbita de equilibrio de los electrones. Toda la estructura era colocada en el mismo plano de la órbita, a algunos centímetros de distancia, en la región del campo magnético de Betatrón donde no existen las fuerzas de focalización. Cuando el expansor de Betatrón aumenta el radio instantáneo de los electrones, estos tienden a la región del campo magnético donde no existen fuerzas de focalización y penetran en el canal interior del "peeler", donde el campo magnético es prácticamente cero; en este canal estos se mueven en la dirección de la tangente a su órbita inicial y salen de la cámara aceleradora a través de una abertura especial.

Este método, utilizado inicialmente con éxito por Skaggs³, permite obtener corrientes de 10^9 Amperios.

Después de ser extraído de la cámara aceleradora, los electrones son colimados y focalizados por intermedio de una lente magnética, cuya área es de algunos milímetros cuadrados, a una distancia de 3 metros del Betatrón. En esta posición se colocó una hoja de oro finísima, en la cual los electrones incidentes producían radiación de "Bremsstrahlung"; los fotones así producidos se propagaban en el espacio y a una distancia de 1 metro incidían en un detector de fotones, formado por una célula de centelleo líquido cuyos impulsos eran detectados por una válvula fotomultiplicadora RCA 5819.

Esta célula de centelleo líquido estaba constituida por un cilindro de poliestireno lleno de fenilciclohexano conteniendo 3 gramos por litro de terfenil y 10 miligramos por litro de difenilhexatrieno

Por otro lado, la hoja de oro en la cual la radiación era producida se encontraba en el borde de un espectrógrafo beta, provisto de un sistema de colimadores tales que los electrones de 3 MeV eran detectados por un cristal de estilbena, ligado también a una válvula fotomultiplicadora RCA 5819.

Los impulsos obtenidos de las dos válvulas fotomultiplicadoras eran amplificados e introducidos a un circuito rápido de coincidencias que será descrito más adelante.

Los electrones que nos irradiaban al atravesar la lámina de oro, proseguían en su trayectoria a través del espectrógrafo beta e incidían en una cámara de ionización utilizada como monitor.

El espesor de la hoja de oro fue escogida de modo que evitara radiaciones múltiples, y también la excesiva difusión de los electrones de baja energía resultantes de procesos de "Bremsstrahlung". Por otro lado, el espesor debe ser el mayor posible por razones de intensidad. Una solución intermedia fue obtenida con una hoja de oro de 1/100 de "longitud de radiación"⁴ (50 mg/cm²).

Un blindaje magnético fue utilizado antes que los electrones del Betatrón penetrasen en el espectrógrafo beta, a fin de impedir que estos fuesen desviados antes de irradiar. Además el detector de fotones fue protegido por un colimador de plomo de 10 cm de espesor a fin de evitar que incidiesen en la radiación suave

proveniente de otras partes del cuarto del Betatrón.

III. LOS CIRCUITOS DE COINCIDENCIAS.

Como fué mencionado arriba, el circuito de coincidencias necesario para registrar los impulsos simultáneos de los detectores de electrones y fotones era rápido; esta necesidad proviene del hecho que se desea eliminar tanto como sea posible las coincidencias casuales; Una vez que todo el espectro de "Bremsstrahlung" incide en el detector de fotones (Fig. 3), de el cual apenas una pequeña banda está en coincidencia con los electrones seleccionados por el espectrógrafo beta, el problema de las coincidencias casuales es muy serio.

A pesar de que existen circuitos electrónicos simples para registrar coincidencias con tiempos de resolución muy cortos, juzgamos mas conveniente utilizar un circuito que, a pesar de no ser demasiado rápido, permitía un análisis aproximado de distribución en el tamaño de los impulsos producidos por los electrones y los fotones. Los circuitos de coincidencia más rápidos, debidos al uso de limitadores, no permiten en general este análisis.

El circuito (Fig. 4) estaba constituido esencialmente por un tubo de oscilógrafo 5XP - 15 DuMont, operando con un potencial de aceleración de 20 keV.; los impulsos de los contadores de electrones y fotones eran enviados del cuarto del Betatrón al cuarto de conteo a traves de cables coaxiales a 3 amplificadores de fabricación Hewlett-Packard, y SKL con un aumento total de 1.000. Los impulsos así obtenidos, del orden de 100 volts, eran lanzados directamente sobre las placas deflectoras del oscilógrafo; con mas precisión, los impulsos del detector de fotones producían una intensificación del haz del oscilógrafo; los impulsos del detector de electrones producían una deflexión horizontal del haz. De esta manera, cuando una coincidencia entre un electrón y un fotón ocurría, el haz del oscilógrafo era intensificado y desplazado de su posición normal. Una máscara cubría la cara del tubo oscilográfico ocultando el haz en condiciones normales. Solamente cuando una coincidencia ocurría era el haz expuesto. Una célula fotoeléctrica común 1P21 era mantenida frente a la máscara y registraba las coincidencias. Los impulsos

producidos eran amplificados por 2 instrumentos de SKL (Spencer Kennedy Laboratories) e iban después a escalador rápido, a un escalador convencional y a un contador mecánico.

Con este sistema a un tiempo de resolución de 10^{-8} segundos podía ser obtenido.

IV. EL ESPECTROGRAFO BETA.

El espectrógrafo beta utilizado era del tipo semicircular de focalizaciones simples, las piezas polares eran rectangulares, así como la cámara de aceleración construida de latón; la altura de la cámara era de 2 cm ; por el lado de entrada de los electrones en el espectrógrafo existían dos orificios en uno de los cuales se encontraba la hoja de oro y en el otro el cristal de estilbeno ; en el lado de salida de los electrones la pared estaba constituida por una película de "nylon" de 1/2 milésimo de pulgada de espesor; la razón para utilizar tal material era la de permitir la salida libre de los electrones que no habían sufrido un proceso de "Bremsstrahlung" en la hoja de oro.

El campo magnético, del orden de 2.000 gauss era obtenido por medio de magnetos permanentes y se extendía por una región de 100 cm^2 .

A pesar de un estudio de las propiedades del espectrógrafo beta realizado por intermedio del método del "alambre flotante" ⁵, se juzgó mas conveniente estudiar sus propiedades en conjunto con todo el sistema del monocromador. Para ese fin el Betatrón fué operado con una energía de 3 MeV. De esa manera los propios electrones incidentes tenían la energía apropiada para la deflexión por el espectrógrafo beta; las condiciones existentes eran entonces las mas próximas posibles a las condiciones reales del funcionamiento del instrumento: además de poseer los electrones incidentes la energía correcta, eran dispersados por la hoja de oro. Variando entonces la energía de los electrones emitidos por el Betatrón en pequeños intervalos, era posible medir la curva de resolución del espectrógrafo beta, correspondiente a las condiciones reales del funcionamiento del monocromador.

Los resultados obtenidos son los de la Fig. 5, donde se ve que el espectrógrafo seleccionaba una banda de electrones de energía $3.00 \pm 0.13 \text{ MeV}$.

Operando el Betatrón a una energía de 20 MeV, los fotones correspondientes a electrones de 3 MeV, son de 17 MeV, lo que daría a la banda de fotones una dispersión de $\sim 2\%$. (Fig. 3).

En la experiencia preliminar arriba citada, fué medida también la distribución integral de los impulsos de los electrones en el centelleo de "estilbena"; por diferenciación obtuvimos la curva diferencial de los impulsos. Estas curvas se pueden ver en la Fig. 5 y muestran, como se esperaba, que todos los electrones producen impulsos aproximadamente iguales; esta figura indica de esta manera, que es posible utilizar un potencial de discriminación de 10 volts cuando menos, en las placas verticales del oscilógrafo.

V. CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MONOCROMADOR

Se hizo una verificación de las condiciones generales del funcionamiento del monocromador, utilizando una línea de atraso en el cable coaxial que conducía los impulsos del detector de fotones al circuito de coincidencias. Inicialmente el sistema era ajustado de modo que con una línea de atraso, los impulsos del detector de fotones y electrones llegasen al mismo tiempo al circuito de coincidencias; en seguida la cantidad de línea era variada a modo de introducir un atraso variable en las señales: de esa manera, se debía dejar de registrar coincidencias reales si el atraso era mayor que el tiempo de resolución del circuito de coincidencias. Utilizando un cable en el cual la velocidad de las señales era de 95% de velocidad de la luz, los resultados típicos obtenidos son los de la Fig. 6.

Con una elección conveniente de voltaje de discriminación aplicado al intensificador del oscilógrafo (en el cual son aplicados los impulsos del contador de fotones), y reduciendo la intensidad del haz del Betatrón por un factor de 10, fué posible obtener una razón de 4.5 para 1 entre el número de coincidencias reales y el de coincidencias casuales. Con ese propósito fué necesario extender la duración de haz de los electrones a 200 microsegundos, por un método descrito por Keegan⁶. En estas condiciones el número de coincidencias reales obtenido era de 50 por minuto.

VI. LA MEDIDA DE COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE HACES MONOCROMÁTICOS DE FOTONES.

La experiencia significativa más simple de realizar con un monocromador de fotones, es la medida de coeficientes de absorción en altas energías. A pesar de que los coeficientes de absorción son bien conocidos para bajas energías, debido a medidas hechas con fotones naturales o artificiales de rayos monocromáticos para altas energías, son muy pocas estas líneas⁷. En particular, además de 6.3 MeV (línea obtenida en la reacción $F^{19}(p, \alpha, \gamma) O^{16}$) las únicas medidas realizadas son las hechas con la radiación gamma de 17.6 MeV emitida en la reacción $Li^7(p, \gamma) Be^8$; esta radiación no es sin embargo rigurosamente monocromática debido a la mezcla de una línea a 14.8 MeV. Naturalmente un monocromador de fotones puede, no solamente dar un coeficiente de absorción, sino que puede también ser utilizado para verificar la continuidad de coeficientes de absorción. A fin de efectuar este tipo de medidas, basta aumentar o disminuir la energía con que los electrones son acelerados por el Betatrón.

Una experiencia preliminar fué hecha con la absorción de rayos X monocromáticos en un bloque de carbono de 111.5 gr/cm^2 de espesor; se tomaron precauciones a fin de que los efectos de mala geometría no perturbasen el experimento⁸. El diagrama general del experimento es el de la Fig. 7 en la que las dimensiones son indicadas. El efecto de mala geometría era en un máximo de 1.5% en los coeficientes de absorción medidos.

En el intervalo de 14.5 - 16.5 MeV, los resultados obtenidos son los de la Fig. 8 en la cual los puntos fueron medidos con una precisión de 3%. La curva continua representa los valores teóricos del coeficiente de absorción, calculados por White⁸. Dentro de la precisión del experimento la concordancia con la teoría es excelente, como puede verse.

La misma experiencia fué repetida aumentando la energía del Betatrón por intervalos de 200 keV, a fin de verificar la continuidad del coeficiente de absorción en esta región; es interesante señalar que eventualmente los niveles de absorción nuclear de fotones aparecerían como una discontinuidad en estos experimentos, en

caso de que fueran suficientemente importantes. Los resultados obtenidos son los de la Fig. 9 en la que la atenuación relativa es indicada en función de la energía. Como puede verse, en este intervalo de energía los coeficientes de absorción varían continuamente con la energía, dentro de la precisión del experimento.

CONCLUSION.

El nuevo instrumento de investigación desarrollado para el Betatrón de 22 MeV, ofrece posibilidades de un amplio programa de medida de coeficientes de absorción electrónica de varias sustancias. El esquema de monocromatización descrito ofrece también posibilidades de identificación de los fotones responsables de las reacciones nucleares; en este caso sería necesaria la medida de coincidencias entre los electrones resultantes de radiación de 'Bremsstrahlung' y las partículas (protones o neutrones) emitidas en reacciones fotonucleares.

El autor desea agradecer la hospitalidad que le fue extendida por el Prof. D. W. Kerst de la Universidad de Illinois, Urbana, Ill. Desea también agradecer las múltiples discusiones con el Prof. Kerst y la ayuda que le fué prestada en las mediciones por los Drs. M. Miwa, B. M. Spicer, y A. S. Penfold.

NOTA

LOS DIBUJOS QUE ACOMPAÑAN A ESTE ARTICULO FUERON PROPORCIONADOS POR EL AUTOR Y LLEVAN LAS LEYENDAS ORIGINALES EN PORTUGUES, CON EXCEPCION DE LA FIGURA 2 EN DONDE LA LEYENDA ESTA EN INGLES. ES OPORTUNO INDICAR QUE LA PALABRA "DOS" QUE APARECE EN ALGUNOS DE LOS DIBUJOS CORRESPONDE AL ARTICULO "LOS" EN ESPAÑOL.

FIGURAS

- Fig. 1 El principio del funcionamiento del monocromador de fotones .
- Fig. 2 El método experimental.
- Fig. 3 El espectro de los fotones y de los electrones en el proceso de "Bremsstrahlung" .
- Fig. 4 Un diagrama del circuito de coincidencias.
- Fig. 5 Curva de resolución del espectrógrafo beta; en el detalle está la distribución diferencial e integral de los impulsos de los electrones.
- Fig. 6 Influencia de una línea de atraso en el número de coincidencias reales.
- Fig. 7 El método experimental para la medida de coeficientes de absorción.
- Fig. 8 Los coeficientes de absorción electrónica en el carbono para energías entre 14.5 y 16.5 MeV.
- Fig. 9 La atenuación relativa en función de energía producida en haces monocromáticos de radiación X, por un bloque de carbono.

REFERENCIAS

- 1.- H. W. Koch (comunicación personal)
- 2.- J. W. Weyl y B. D. McDaniel, Phys.Rev. **92**, 391 (1953)
- 3.- L. S. Skaggs, G. M. Almy, D. W. Kerst y L. H. Lanzl, Phys.Rev. **70**, 95 (1946)
- 4.- W. Heitler. The quantum theory of radiation, the Clarendon Press, 1936, Oxford
- 5.- L. Cranberg, MDDC 937 (no publicado)
- 6.- T. J. Keegan. Rev.Sci.Inst. **24**, 472 (1953)
- 7.- W. A. Fowler, C. C. Lauritsen y T. Lauritsen. Rev.Mod.Phys. **20**, 236 (1948)
- 8.- G. R. White, X-ray attenuation coefficients. National Bureau of Standards Report 1003, U. S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1952)

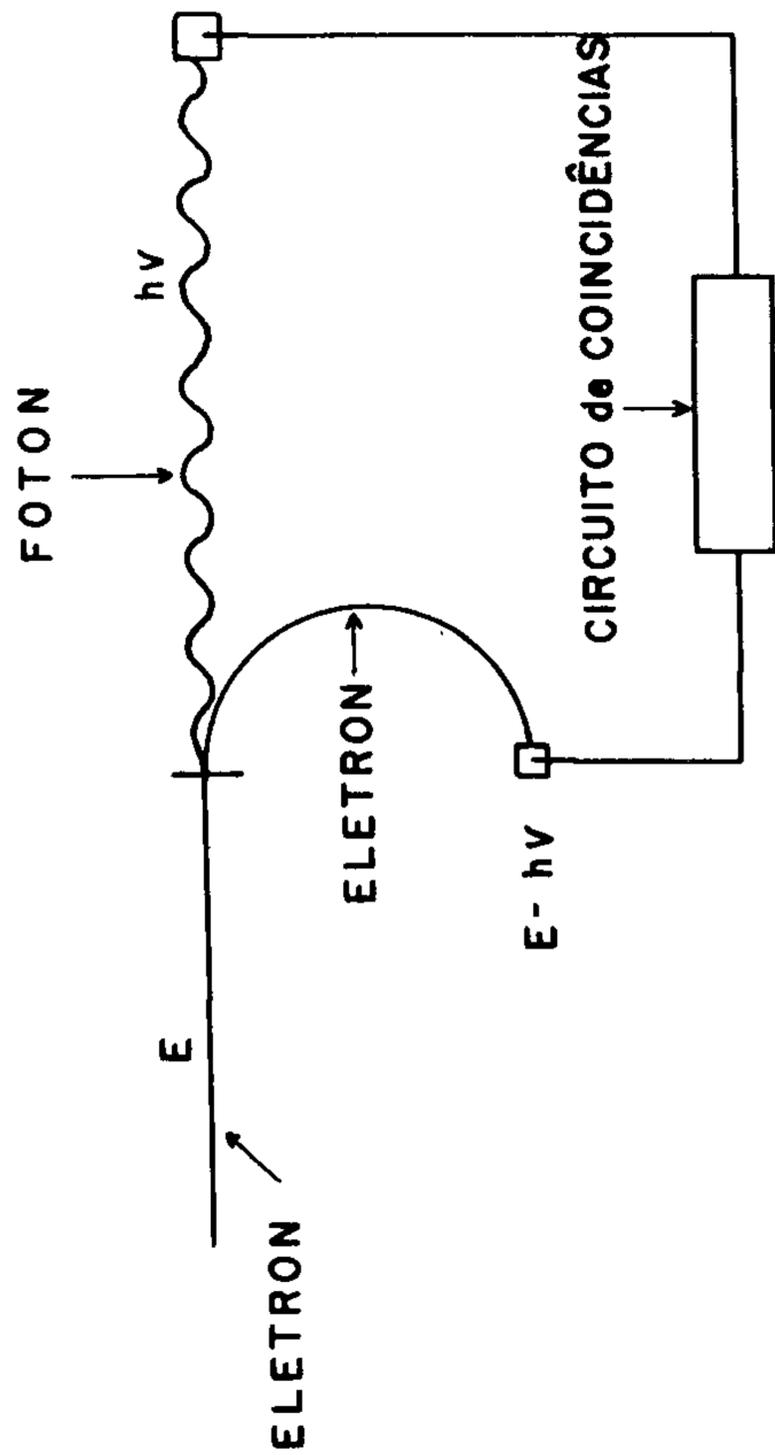


Fig. 1

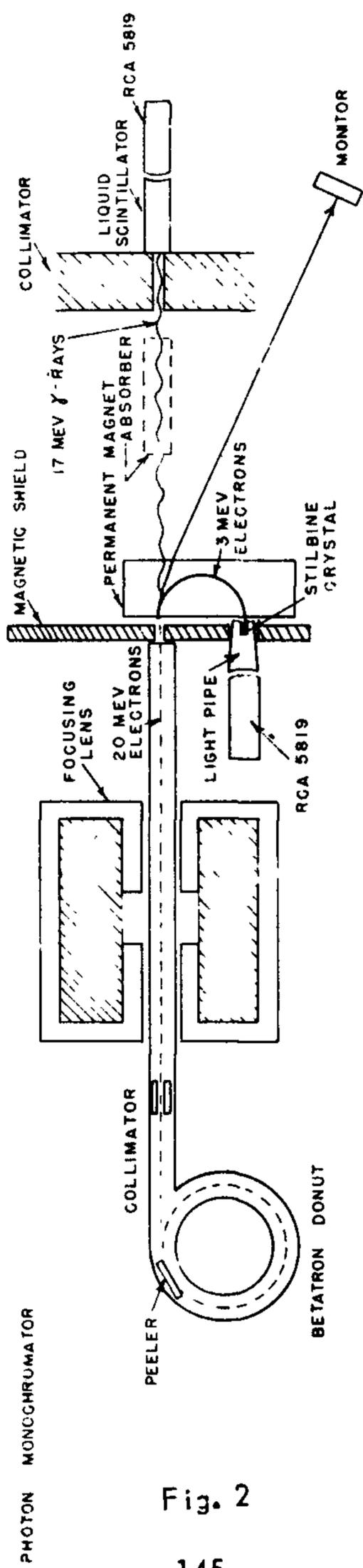


Fig. 2

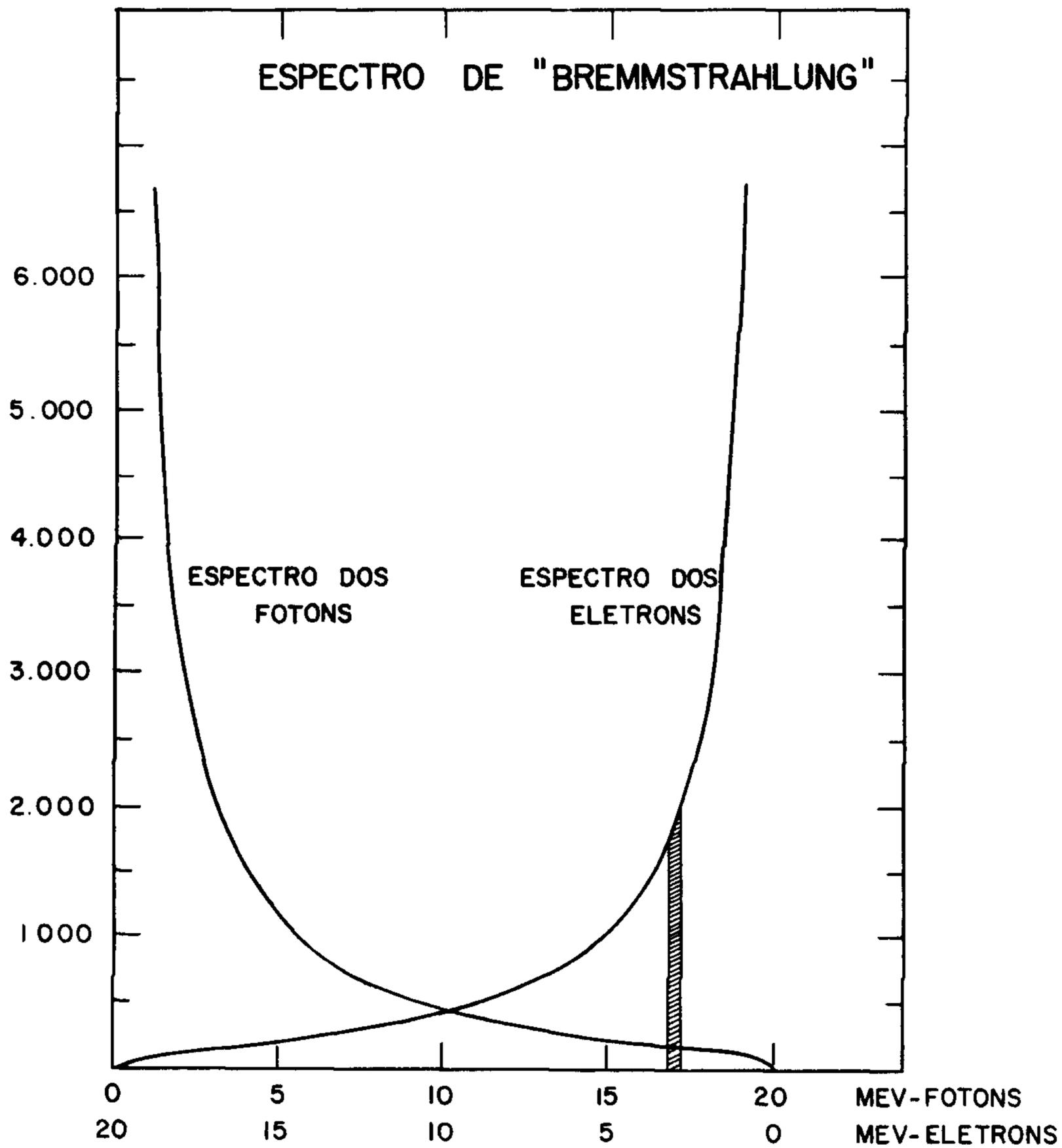


Fig. 3

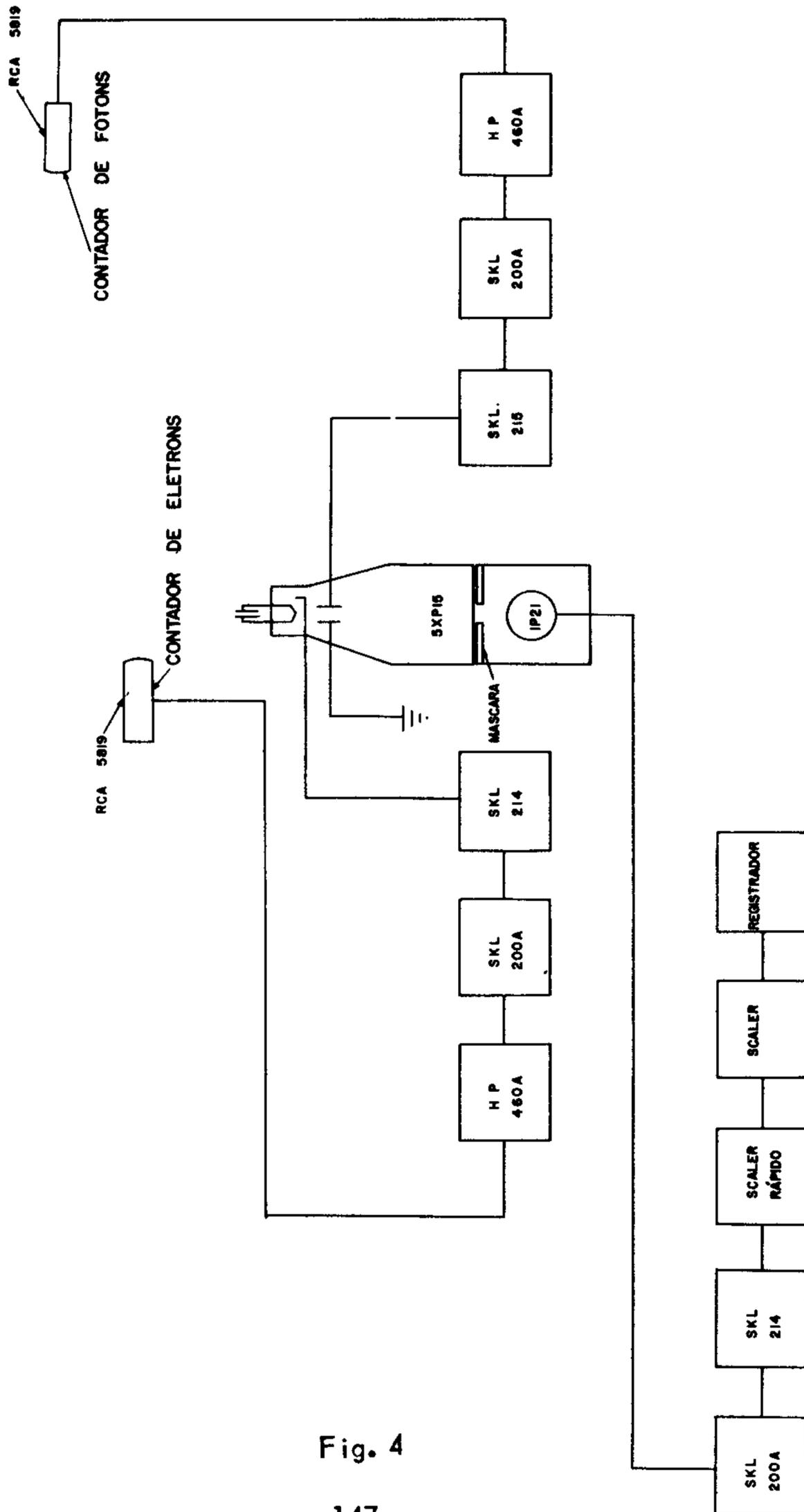


Fig. 4

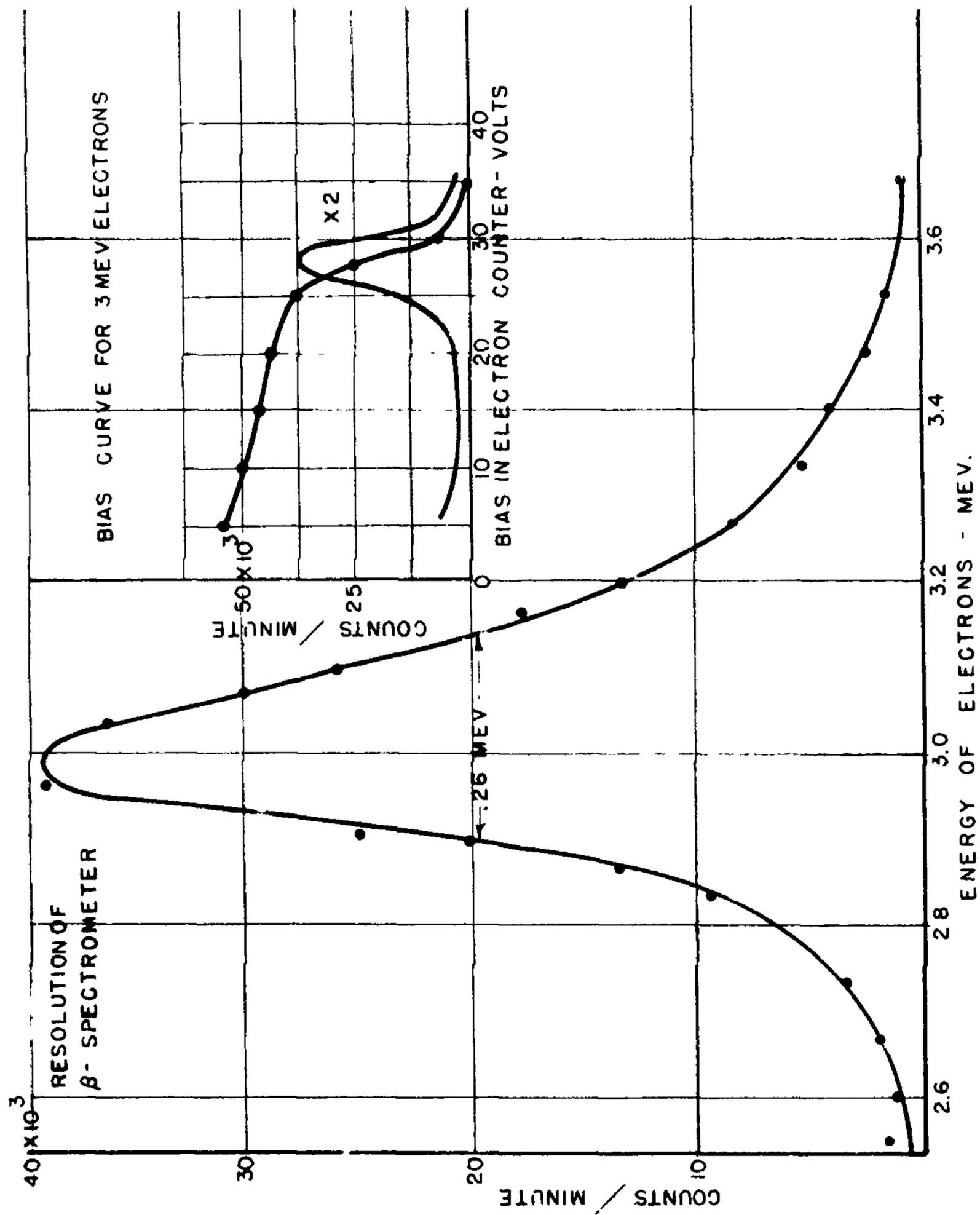


Fig. 5

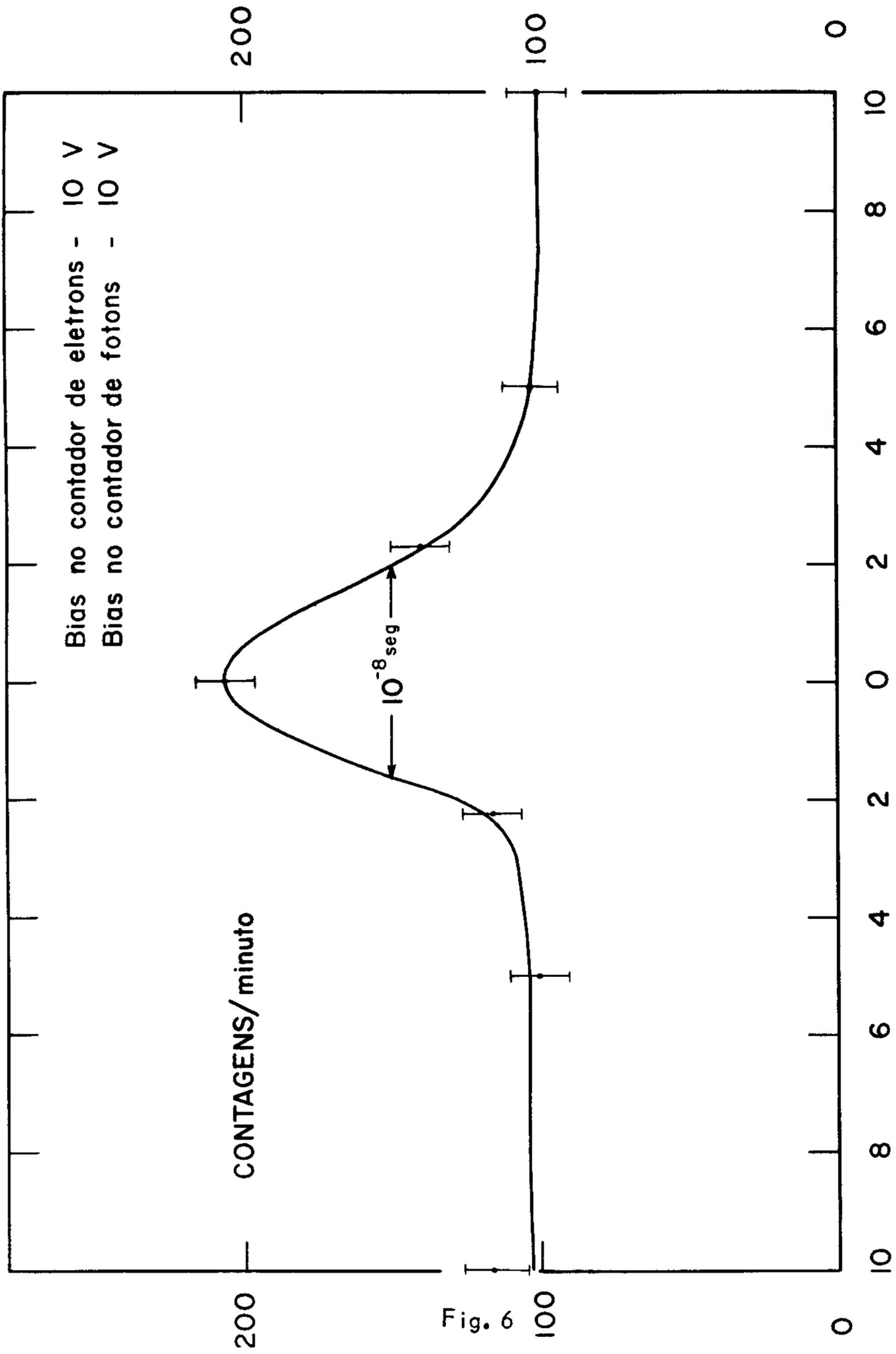


Fig. 6

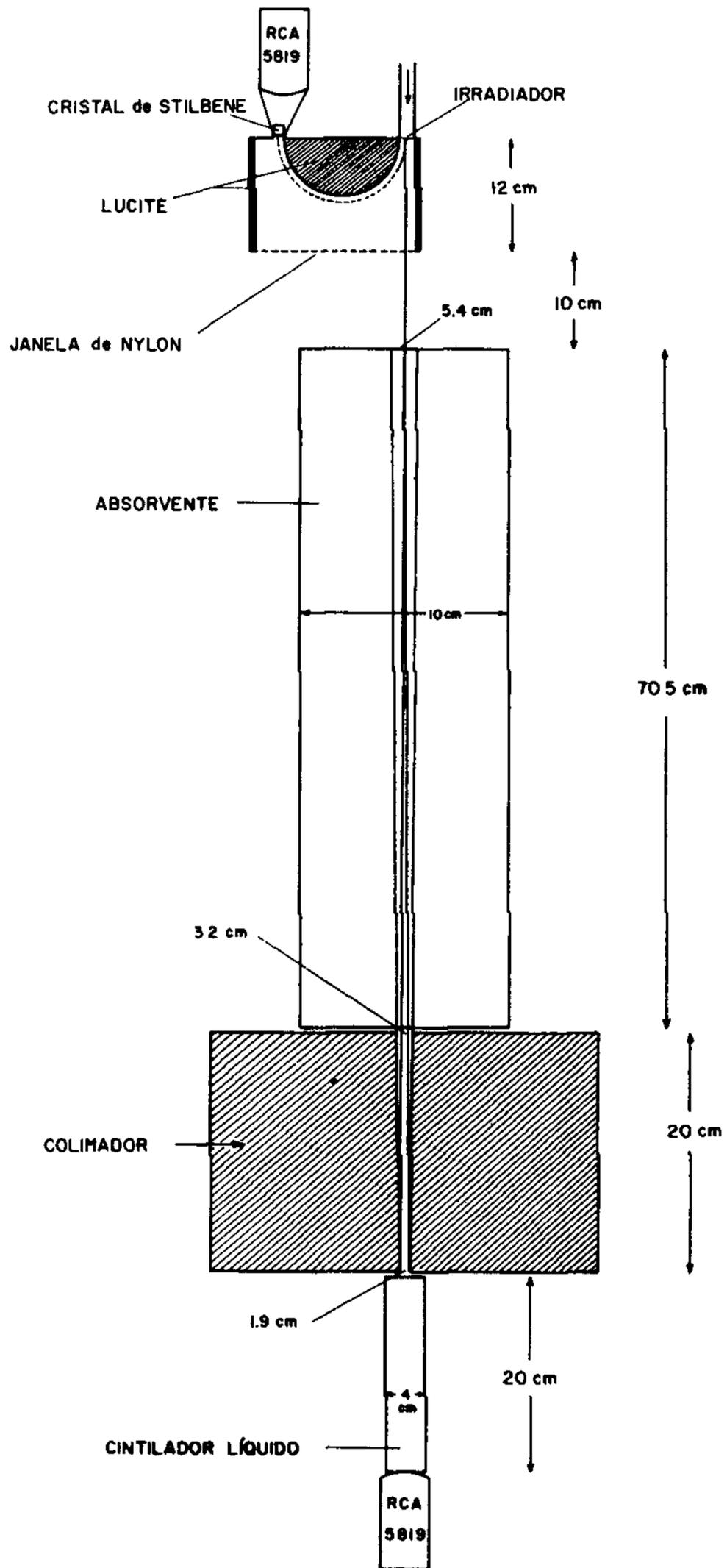


Fig. 7

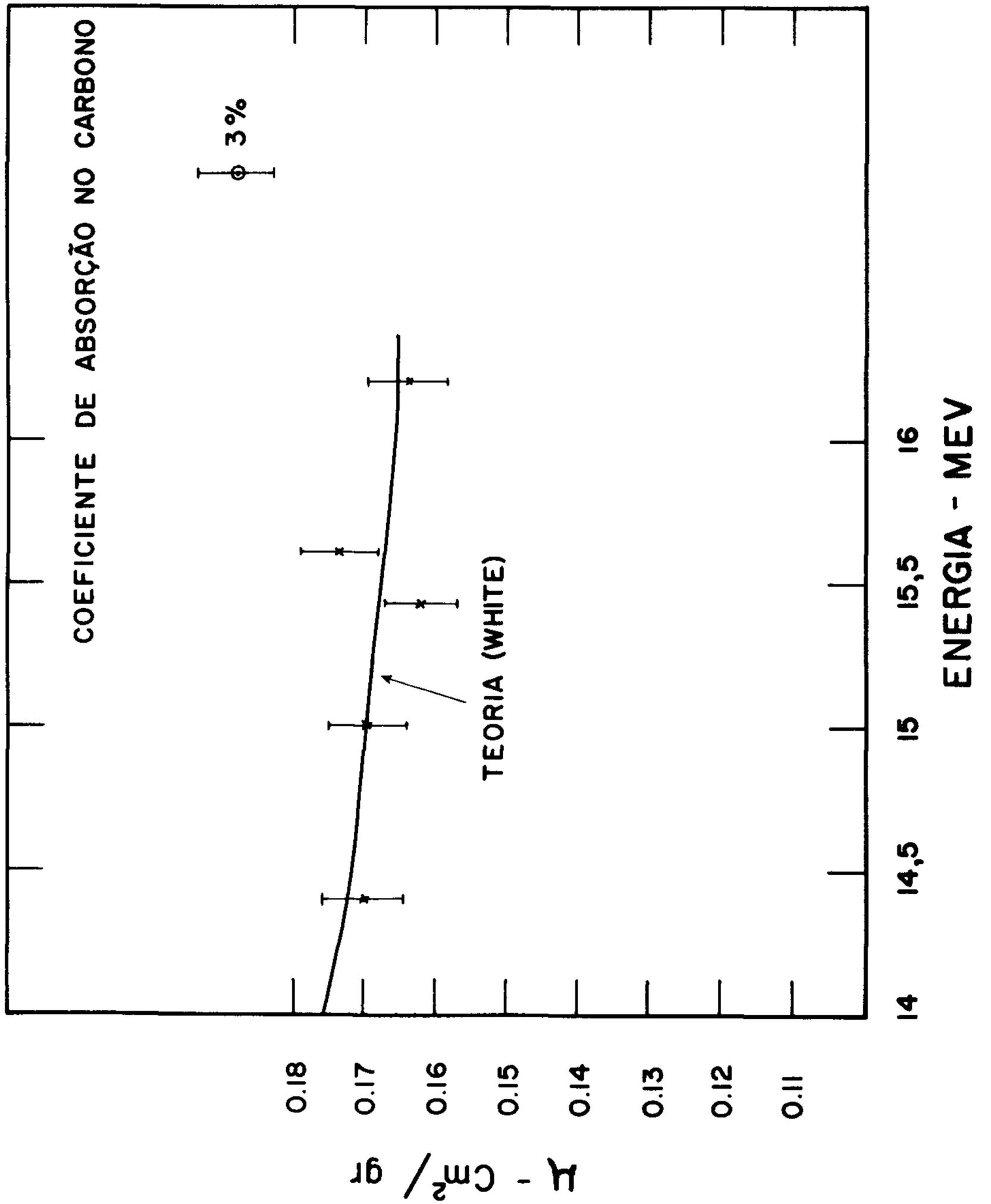
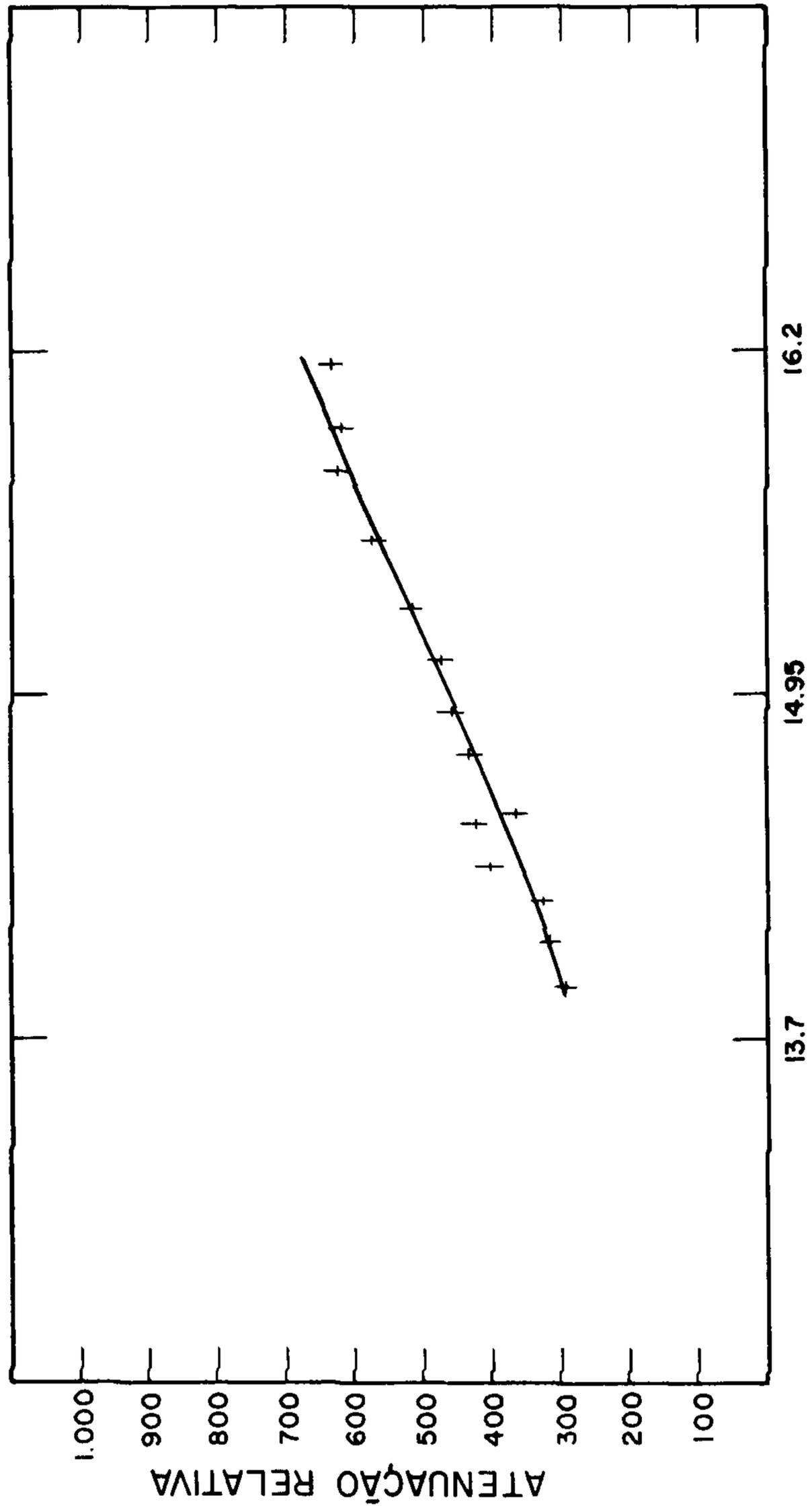


Fig. 8



MEV

Fig. 9