

Leopoldo Muzzioli

Los medios experimentales de la física de hoy



AS doctrinas del calor y de la electricidad que se desarrollaron en el siglo XIX y dieron lugar a aquellas maravillosas construcciones conceptuales, que son la termodinámica y la electrodinámica, debidas a investigaciones teóricas y experimentales tan profundas y elegantes, se refieren a la materia y a sus manifestaciones energéticas, en su conjunto.

Por esta razón la termodinámica y la electrodinámica y podría agregar también, la físico-química del siglo XIX, deben ser consideradas como disciplinas que se refieren al mundo macroscópico, así que estas ciencias podían dar lugar a la concepción atomística de la materia solamente a través de razonamientos inductivos, y el atomismo habría quedado por lo tanto, una pura especulación filosófica, si bien por otro lado muy plausible, no hubiesen intervenido métodos experimentales modernos de indagación, sobre las últimas partículas que constituyen la materia. Y las efectivas demostraciones experimentales de la

realidad de los átomos, pertenecen, como se sabe, a nuestro siglo. Aun antes que estas demostraciones experimentales fuesen realizadas, ya la teoría cinética de los gases había, hacía tiempo, dado la posibilidad de calcular; la velocidad con que las moléculas de un gas se mueven, el número de choques que ellas sufren en un segundo, sus dimensiones, el número de ellas que se encuentra en un centímetro cúbico, etc.; y con la unión del mundo submicroscópico invisible, al macroscópico visible mediante fórmulas matemáticas, la teoría cinética había ya dado el medio de descender de los fenómenos que se refieren a la materia asociada, y revelables experimentalmente, a los hechos moleculares, dando de esta manera a la hipótesis atómico molecular una verosimilitud que se acercaba a la certeza.

Pero he aquí, que hacia el final del siglo XIX, casi por milagro se manifiestan al físico hechos nuevos que revolucionan aún la concepción atomística: la expulsión espontánea o artificial por la materia de corpúsculos cargados de electricidad, la producción de los rayos X por el bombardeo de la materia por parte de algunos de estos corpúsculos, etc., hechos nuevos que demostraban la existencia en la constitución de la materia de estos corpúsculos y la posibilidad que ésta estuviera constituida por los corpúsculos mismos.

El físico del siglo XX sintió por lo tanto la necesidad de ocuparse directamente de los componentes elementales de la materia y de la acción recíproca de los distintos campos eléctricos, atómicos y moleculares, acción que da lugar a la unión de los átomos en las moléculas, a la unión de las moléculas en los cuerpos, esto es el problema fundamental de la química.

Y de aquí surgieron, como se sabe, dificultades enor-

mes ya que al descender de las manifestaciones energéticas del macrocosmo, hasta los mecanismos del microcosmo; las doctrinas que he mencionado (la termodinámica y la electrodinámica) en apariencias perfectas no eran sino aproximadas y válidas sólo para los elementos asociados.

Por otro lado, si la naturaleza de la luz, y en general de la energía radiante con respecto a su propagación, había sido objeto de estudio profundo y concluyente en el siglo XIX, de modo que, ya en el siglo pasado se pudo afirmar que la luz en su propagación es de naturaleza ondulatoria con ondas transversales y electromagnéticas, muy poco, y me atrevería a decir, nada se conoce al iniciarse el siglo XX, sobre lo que es la luz en el instante en que parte del cuerpo que la emite y en el instante en que llega al cuerpo que la recibe.

Por lo tanto problemas nuevos, de importancia fundamental debe resolver el físico del siglo XX.

¿Cuál es la naturaleza de la energía radiante, y cuál es la naturaleza de la materia en sus últimas y originarias estructuras y manifestaciones?

Como se ve claramente la herencia que la física del ochocientos dejó a la del novecientos corresponde a dos problemas de fundamental importancia para el conocimiento de la naturaleza.

¿Cuáles serán los medios de investigación experimental que usará el físico moderno para hacer estas nuevas investigaciones?

¿Serán suficientes los instrumentos legados del ochocientos, como el termómetro, el calorímetro, el galvanómetro, el electrómetro, el microscopio, el espectroscopio, etc.?

Tales instrumentos son insuficientes, el físico mo-

derno deberá casi abandonar el termómetro y el calorímetro y deberá crear en cambio otros dispositivos aptos al fin deseado, usufructuando de algunos instrumentos legados, como el galvanómetro, el electrómetro y el espectroscopio.

* * *

El primer problema que aborda el físico del novecientos es aquel de la emisión luminosa; por esta razón el instrumento fundamental que usa es el espectroscopio en sus multiformes variedades.

El espectroscopio fué inventado en substancia por Newton. (Fig. 1).

En el libro primero de su óptica, se encuentra descrita la bien conocida experiencia de la dispersión de la luz por medio de un prisma que él hizo por primera vez en el año 1666 y describió en esta forma: «un orificio practicado en la persiana cerrada de una ventana deja penetrar un rayo de sol; éste, se hace caer sobre una de las caras de un pedazo de vidrio de sección triangular, el prisma. Sobre la pared frente a la ventana en vez del disco redondo y blanco que se obtendría sin el prisma se ve una faja diversamente coloreada de un extremo al otro. El rojo está de la parte de los rayos menos desviados, el violeta de la otra; en el medio se encuentran en seguida el amarillo, el verde, el azul y el índigo».

Esto escribió Newton en el 1666, pero Newton y por muchos años sus sucesores, no tuvieron a su disposición sino el sol y la lámpara de aceite como fuentes de luz, en consecuencia la espectroscopía, que es en substancia la disciplina que estudia la composición de la luz emitida por los cuerpos, no podía nacer y

desarrollarse, antes que los físicos tuvieran a disposición la materia prima objeto del estudio.

Ya en el siglo XIX además de la llama y del arco eléctrico, con el progreso de la técnica del vacío fué posible la descarga eléctrica en el interior de los tubos en las más variadas condiciones, por consiguiente fué posible el estudio del análisis espectroscópico de la luz emitida por los cuerpos excitados en los más diversos modos.

Y el análisis espectroscópico ha dado resultados verdaderamente maravillosos. Ante todo se ha constatado que los cuerpos sólidos incandescentes dan todos lugar a una sucesión continua de colores; que en cambio los gases y vapores excitados térmicamente o por medio de la electricidad presentan una sucesión de colores discontinua. En este último caso si se registra el espectro sobre una placa fotográfica, se obtiene un espectro obscuro surcado de varias líneas brillantes paralelas dispuestas diversamente una respecto a la otra según la fuente luminosa que se considera.

En la Fig. 2 se ven los espectros de emisión de los gases luminosos de algunos elementos vaporizados en el arco eléctrico. Se ven las líneas luminosas en campo obscuro, características de cada elemento.

La sucesión continua de colores obtenida de los cuerpos sólidos incandescentes, o la serie de líneas coloreadas obtenidas de los gases y vapores luminosos constituyen el espectro de las radiaciones luminosas producidas por las diversas fuentes llamado «espectro de emisión» porque corresponde al espectro de la luz emitida por los cuerpos que se consideran.

El espectro continuo de los cuerpos incandescentes depende sobre todo de su temperatura; su composición química tiene poca influencia; por eso el astró-

nomo que desde la tierra fotografía el espectro de la luz emitida de una estrella puede deducir la temperatura de la estrella misma, como si la tuviese en su observatorio.

El espectroscopio adquiere por lo tanto las funciones de un potente termómetro.

El espectro discontinuo de un elemento depende en parte del modo de excitación, todavía si la excitación queda la misma, las sustancias simples emiten espectros diversos que las caracterizan con extrema precisión.

Podemos, por lo tanto, reconocer la naturaleza de los cuerpos que están volatilizados en la llama, en el arco o en la chispa. Podemos distinguir, por ej., el Litio que excitado por la llama produce en el espectro de emisión una línea roja del sodio que produce en cambio dos líneas amarillas. Pequeñísimas cantidades de sustancias que no se podrían observar con los métodos químicos, son al contrario puestas en evidencia por el espectroscopio. El espectroscopio, permite reconocer la presencia de un metal en una sustancia; basta hacer luminoso el vapor de la sustancia, y verificar si el espectro de emisión contiene las líneas del metal que se busca; y la sensibilidad es verdaderamente fantástica, basta un diez millonésimo de miligramo de sodio para hacer aparecer la doble línea amarilla característica de este elemento.

El espectroscopio es por lo tanto un delicado y seguro instrumento de análisis químico.

Si delante de una fuente de luz que produce un espectro continuo, como por ej. el filamento de una lámpara eléctrica o el carbón de un arco voltaico, ponemos un vapor o gas excitado, el espectro continuo de la fuente aparece surcado de líneas oscuras transver-

sales. Estas líneas oscuras se encuentran en la misma posición que las líneas luminosas que el gas o vapor habría producido en el espectro de emisión. Colocando por lo tanto delante de un cuerpo incandescente a espectro continuo un gas o un vapor excitados se obtiene la sucesión de los colores surcados por líneas oscuras. Se obtiene en otros términos lo que se llama «espectro de absorción» en cuanto corresponde a la luz absorbida por los diferentes gases y vapores, que sirve entre otros para completar el análisis químico de dichos gases o vapores, si se quiere para mayor seguridad una confirmación del análisis con el espectro de emisión.

En la Fig. 3 se ve el espectro de absorción del hidrógeno atómico (Serie de Balmer); se ven las líneas oscuras de absorción características de este elemento. Tales líneas, como hemos dicho, se encuentran en la misma posición de las líneas luminosas que produciría el hidrógeno en el espectro de emisión.

Muchos cuerpos celestes son incandescentes y rodeados perennemente de gases y vapores luminosos. El espectro continuo de estos cuerpos celestes está surcado de numerosas líneas oscuras de absorción, que revelan al astrofísico la composición química de estas estrellas como si fuesen analizadas en un laboratorio de química.

Por ej. en el espectro solar, con los diferentes colores: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, violeta encontramos numerosas líneas oscuras llamadas líneas de Fraunhofer que demuestran la existencia en la atmósfera incandescente del sol de los varios elementos definidos por las líneas mismas. Muchísimos hasta ahora son los elementos comprobados; entre ellos el calcio, el fierro, el níquel, el aluminio, la plata,

el cinc, el cobre, el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, el helio; todos elementos conocidos en origen sobre la tierra excepto el helio. El nombre mismo tomado del griego «elios» indica su origen.

Fué en efecto durante el eclipse solar del 1868 que se puso en evidencia la presencia de una línea que no podía identificarse con la de ningún otro cuerpo conocido sobre la tierra, y sólo en el 1895 Ramsay, experimentando sobre la claverita (un mineral de uranio de Groenlandia), consiguió extraer un gas que presentaba en el espectro una línea en la misma posición de la línea del helio. Dado que ningún otro elemento terrestre entonces conocido presentaba un espectro de idéntica característica, Ramsay dedujo que se trataba de un nuevo elemento y lo llamó cripto. Fué Crookes que reconoció la identidad entre el cripto (terrestre) y el helio (solar).

Así el helio pudo entrar a tomar parte del sistema de los elementos; y con el análisis espectroscópico, se pudo obtener una confirmación más de la unidad en la composición del universo.

Muchas propiedades de los átomos y de las moléculas pueden deducirse del estudio de las radiaciones luminosas.

Se puede decir, por ej., si el centro emisor es simple o unido en moléculas, si es neutro o si ha perdido cargas eléctricas: se puede contar también el número de las cargas eléctricas negativas elementales que él ha perdido.

Además las líneas emitidas de una fuente que se encuentra bajo la acción de potentes campos eléctricos o magnéticos, son profundamente modificados.

En la Fig. 4 se ven las modificaciones de las líneas por efecto de un campo eléctrico: en este caso de 1,6

millones de volt. por cm. Las líneas H_α , H_β , H_γ , H_δ , son las del hidrógeno. Se ve que mientras la H_α existe también en los campos eléctricos más elevados las otras líneas cesan progresivamente de existir con el aumento del campo.

En base a la observación de estas modificaciones, el físico puede argumentar sobre la presencia de campos magnéticos o eléctricos, y el astrofísico puede revelar la existencia de poderosos campos magnéticos en las manchas solares.

El espectroscopio adquiere por lo tanto las funciones de un potente medidor de campos eléctricos y magnéticos.

Con el espectroscopio podemos saber si los centros luminosos están en reposo o en movimiento relativo, y cuando se mueven, que velocidad relativa poseen. El efecto del cual se usa es el conocido efecto Doppler.

Una fuente luminosa en movimiento, relativamente a un observador, aparece diversamente coloreada; en tal caso sobre una plancha fotográfica se registran líneas que están corridas respecto a aquellas que son características de la fuente en reposo. Del desplazamiento de estas líneas, se obtiene, con un simple cálculo, la velocidad de la fuente luminosa.

Este efecto, sirve para reconocer en el laboratorio la velocidad de los corpúsculos luminosos proyectados a alta velocidad en los tubos a vacío, y al astrofísico sirve para medir la velocidad con la cual se acercan o se alejan de la tierra ciertos cuerpos celestes.

Por ejemplo los dos espectros representados en la Fig. 5, son debidos a la luz recibida de los dos bordes, oriental y occidental del sol: en el primer caso la fuente luminosa se acerca a la tierra por efecto de la rotación del sol, mientras en el segundo caso se aleja; en los dos casos la luz ha atravesado la atmósfera terres-

tre y ciertas líneas en los espectros se deben a la absorción del oxígeno atmosférico, tales líneas quedan en la misma posición, dado que la atmósfera terrestre no se mueve respecto a la tierra. Los dos espectros están puestos unos sobre el otro, de modo que las líneas de absorción del oxígeno terrestre se encuentren en correspondencia, así que los largos de ondas iguales en los dos casos ocupan exactamente la misma posición. Se observa entonces que las otras líneas no están exactamente sobrepuestas: estas últimas se deben a la absorción de los vapores de fierro en la atmósfera solar. La diferencia de posición se debe al efecto Doppler en cuanto las líneas resultan desplazadas hacia el violeta en el caso de la luz que proviene del lado del sol que se acerca; y hacia el rojo en el otro caso. La presencia de las líneas de absorción del oxígeno terrestre facilita la comparación de los dos espectros.

Las medidas astrofísicas de esta naturaleza no dependen de la distancia de la fuente luminosa, por consiguiente el estado actual de la Física en este campo de las investigaciones, se encuentra en una situación extraordinariamente extraña, o sea, mientras la mayor parte de las estrellas están demasiado lejanas para que los movimientos transversales puedan ser observados y medidos mediante variaciones de ángulos, se puede en cambio, medir con gran precisión los movimientos de acercamiento y de alejamiento que, a primera vista, parecerían de medida mucho más difícil.

En 1932 los astrónomos americanos Hubble y Humason sirviéndose del telescopio de Monte Wilson de dos metros y medio de abertura, pudieron determinar la velocidad radial de las nebulosas a espirales más lejanas. A pesar de que ellas están formadas de un

gran número de estrellas diversas, el espectro global presenta el carácter estelar y se ven particularmente las líneas H y K del Calcio Ionizado así que por confrontación con las mismas líneas que figuran en el espectro del sol, se puede deducir, sirviéndose siempre del efecto Doppler, la velocidad radial de cada nebulosa a espiral. Ahora bien, el resultado sorprendente observado es que cada una corre tanto más lejos está y que todas se alejan de nuestro pequeño sistema solar.

La velocidad está más o menos proporcional a la distancia, y todas señalan una fuga: nació así la hipótesis de la así llamada «expansión del Universo». El coeficiente de proporcionalidad es más o menos 550 kms. por segundo de alejamiento, por cada 3.26 años luz de distancia.

Varios argumentos fueron elaborados en los últimos años para explicar el problema de la «expansión del Universo», y no podemos ocultar que realmente no todos comprueban la hipótesis que la velocidad del alejamiento de las nebulosas espirales sea real. Si se admite con Einstein que los fotones de luz pierdan, al llegar a la tierra, parte de su energía, el espectro revelará un aumento de largo de onda, o sea, las líneas espectrales estarán desviadas hacia el rojo.

Alrededor de este sugestivo problema que se concierne con la relatividad general, discuten actualmente los mayores astrónomos y matemáticos del mundo.

Es oportuno señalar, en fin, que siempre por medio del efecto Doppler, se ha verificado con seguridad que muchas estrellas se acercan y se alejan con intervalos de tiempos iguales, lo cual hace suponer que cada una de ellas tenga un centro obscuro alrededor del cual giran.

El espectroscopio adquiere por lo tanto las funciones de un maravilloso y potente taquímetro, medidor de velocidades.

Estos simples datos sobre las aplicaciones astrofísicas de la espectroscopía, además de ser tan sugestivos, creo que demuestran claramente cuál riqueza de informaciones nos puede dar el análisis espectroscópico de la luz proveniente de las diferentes partes del Universo.

Después de todo, nosotros tenemos el conocimiento del Universo que nos circunda, porque la infinidad de los astros perdidos en la inmensidad del espacio emiten radiaciones también visibles, y es la luz que llega a nosotros que nos da la posibilidad de tener, diría, la sensación del Universo.

Pero la simple visión, aunque nos dé una sensación maravillosa, especialmente en una clara noche de cielo estrellado, no nos da una noción, diría, cuantitativa, como está en grado de darnos en cambio, aquel maravilloso instrumento que es el espectroscopio.

Además de los prismas de vidrio, de cuarzo o de sal gema que se usan según las radiaciones a estudiar, se tiene aun otro medio para la dispersión de la luz, el retículo, que consiste, como se sabe, en una superficie plana o cóncava de metal o de vidrio finamente estriada por medio de una máquina de dividir de extrema precisión; los surcos que se tienen en un buen retículo son de diez mil a veinte mil líneas por centímetro.

Con el descubrimiento de los rayos X que en la propagación son de naturaleza ondulatoria transversal y electromagnética como la luz, la espectroscopía ha extendido su campo de acción.

Los rayos X descubiertos por Roentgen en el año

1895 se obtienen, lanzando un haz de corpúsculos negativos, los electrones, contra un bloque metálico.

Pero si los rayos X fueron descubiertos en 1895, como hemos dicho, el análisis espectroscópico de estas radiaciones nace solamente en el año 1912. En efecto, analizar estas radiaciones con un prisma no es posible, porque ellas no sufren la refracción; también un retículo óptico es poco apto para dispersarlas; para obtener la dispersión es necesario un retículo que no sea trazado sobre vidrio o metal por una máquina construída por el hombre, pero es necesario algo más delicado y perfecto dada la elevadísima frecuencia de los rayos X; es necesario un retículo creado por la divina mano de la naturaleza.

¿Existe tal retículo?

Fué en el año 1912 que Laue hizo el maravilloso descubrimiento de la difracción de los rayos X con un cristal.

Este descubrimiento dió entre los demás la posibilidad de poner en relieve la naturaleza ondulatoria de los rayos X y de reconocer en ello la misma naturaleza de la luz, que anteriormente no se había podido aún verificar.

Por lo tanto el retículo apto para los rayos X es un cristal.

En un cristal los átomos se disponen en los vértices de poliedros elementales. Esta disposición da al cristal la posibilidad de actuar en el mismo modo de los retículos de difracción fabricados artificialmente y usados para la luz.

Solamente que en el caso del retículo artificial las líneas pueden ser, como hemos dicho, al máximo 20 mil por centímetro, o sea, la distancia entre un surco y otro puede ser al máximo $5/100.000$ de cm. y esta

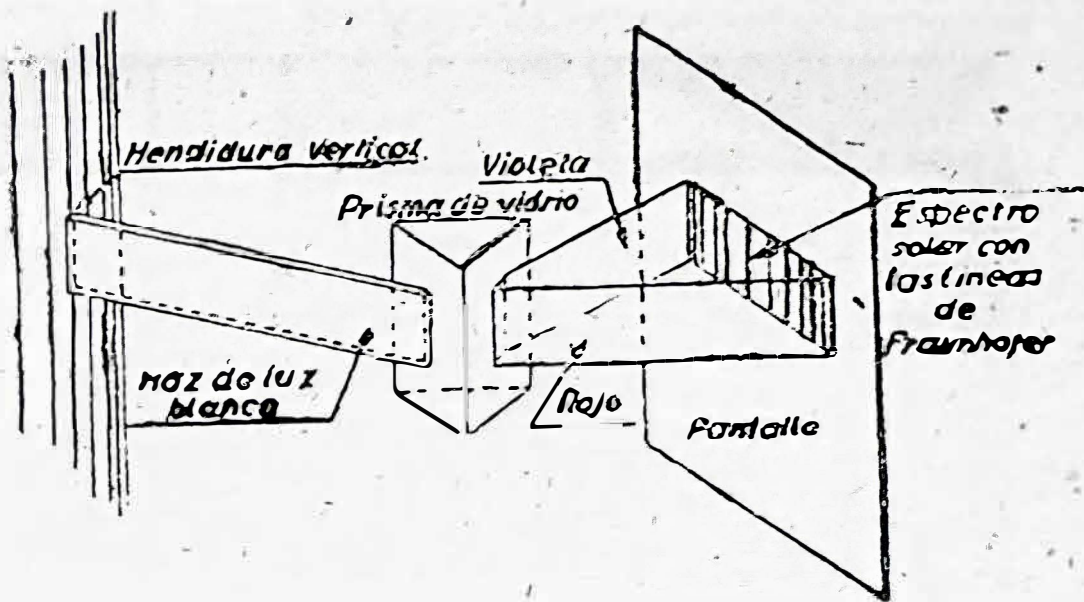


Fig. 1

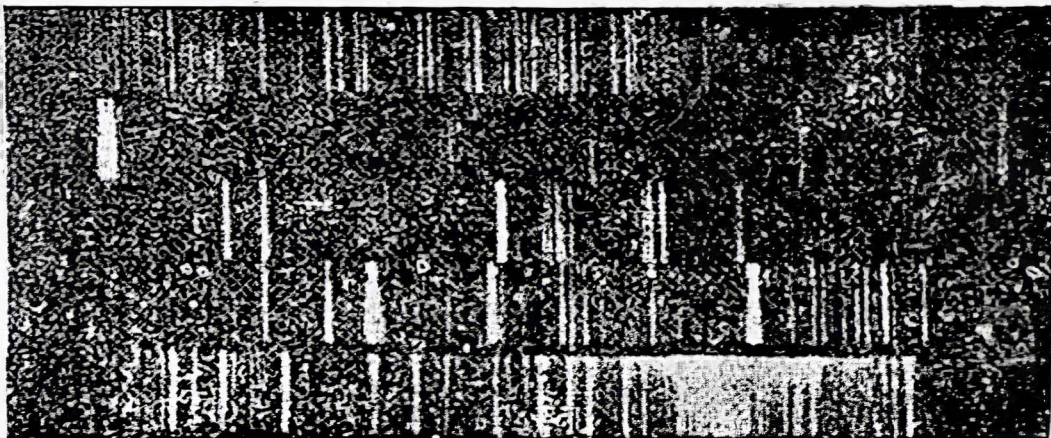


Fig 2

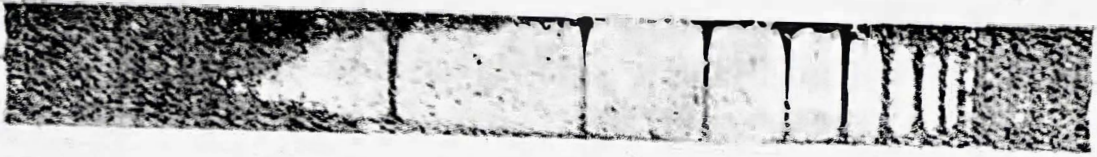


FIG. 3

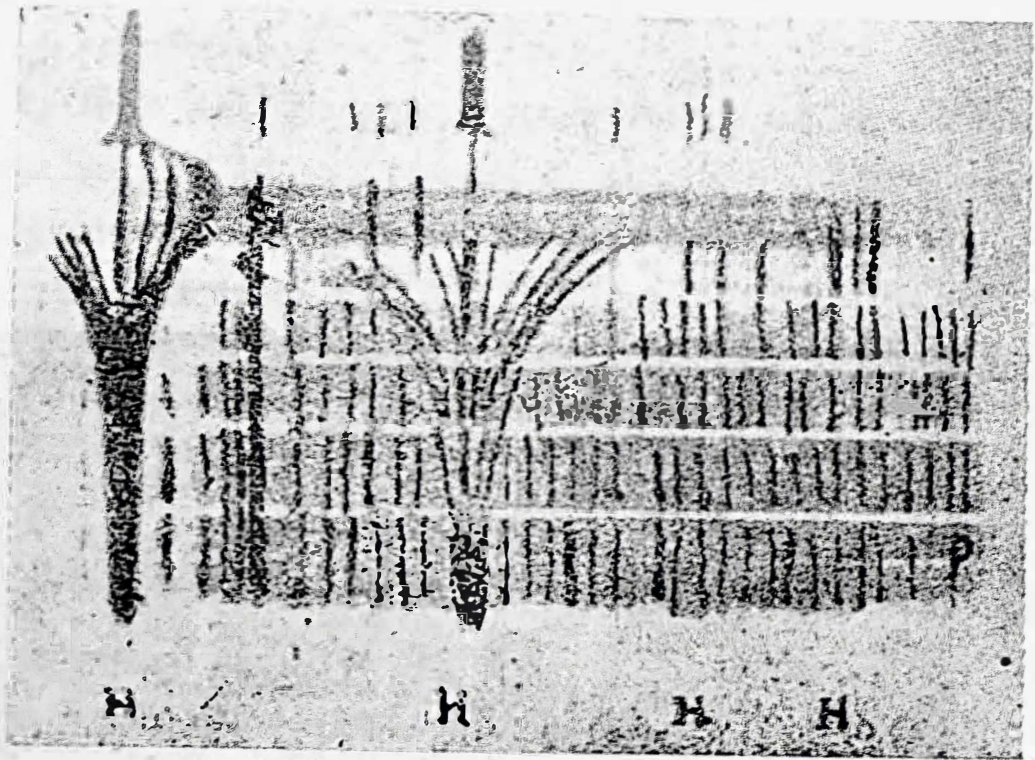


FIG. 4

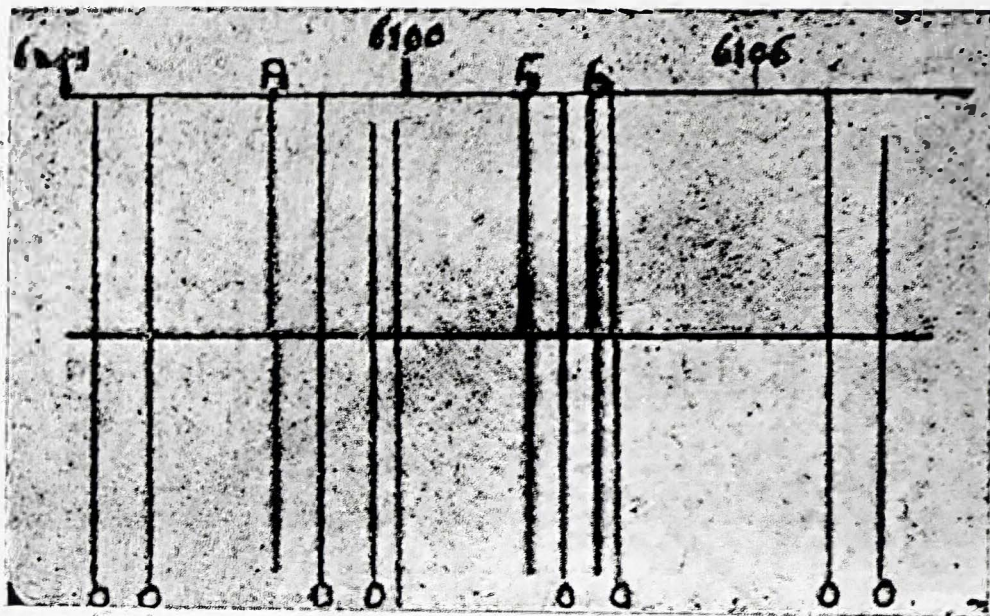


Fig. 5

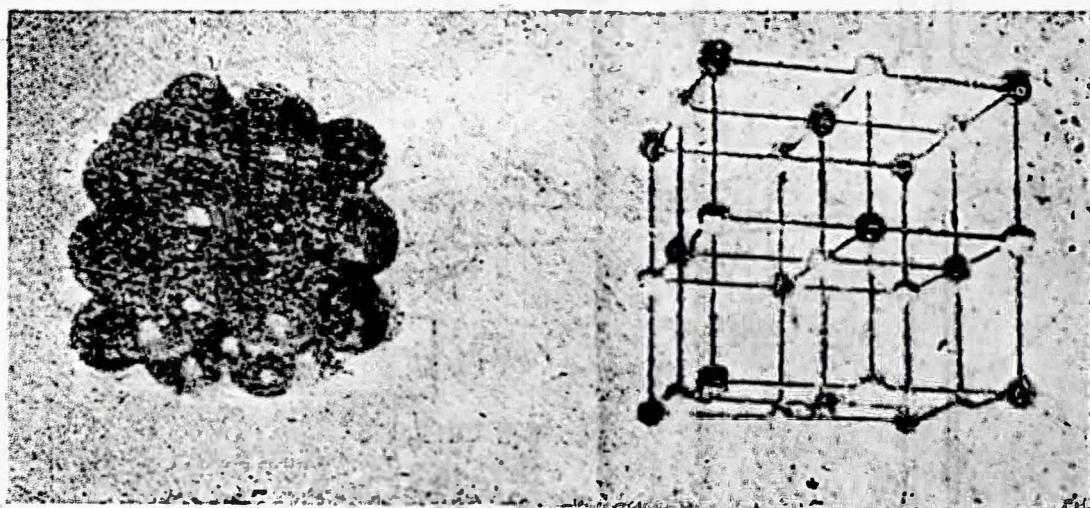


Fig. 6

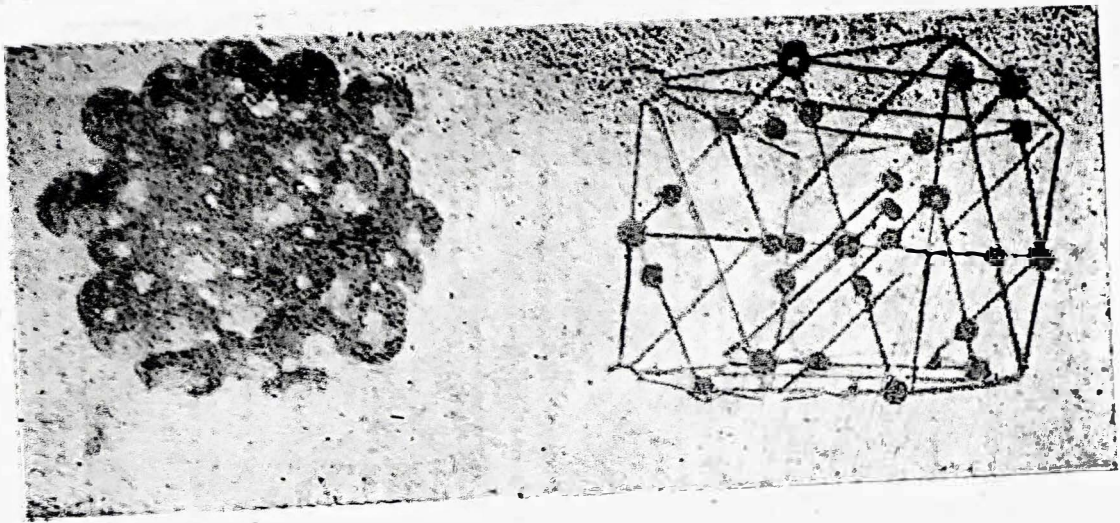


Fig. 7

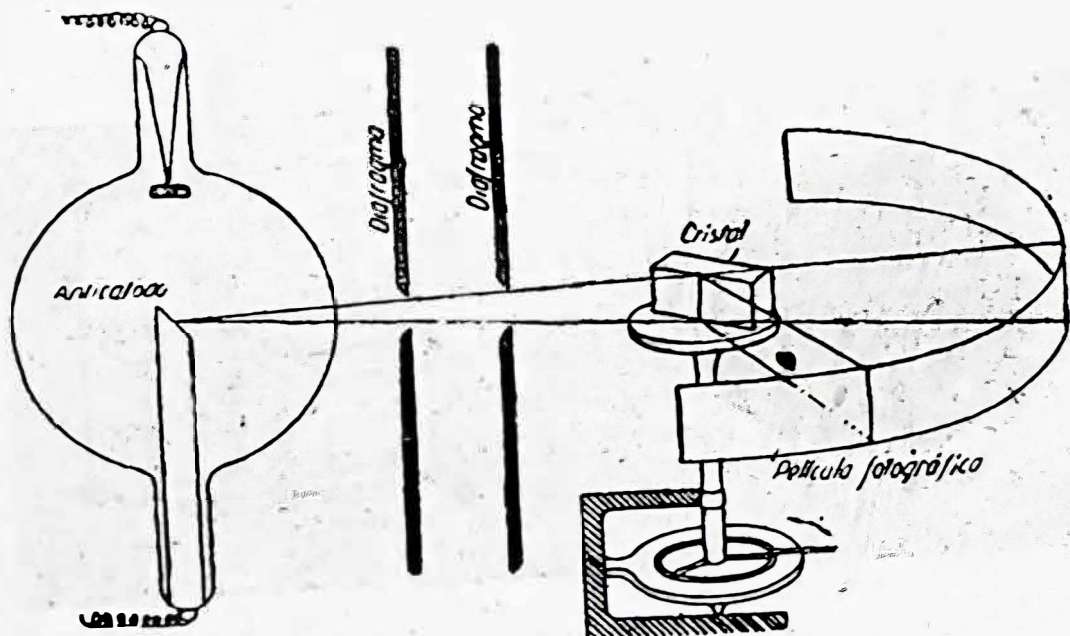


Fig. 8

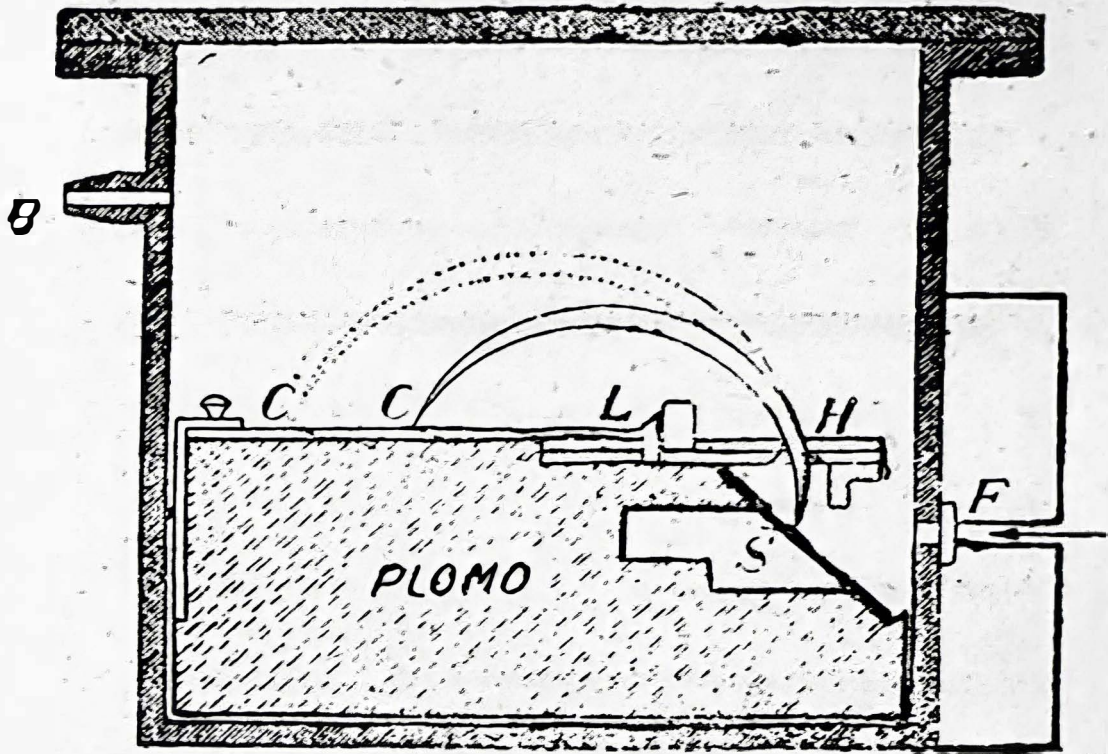


Fig. 9

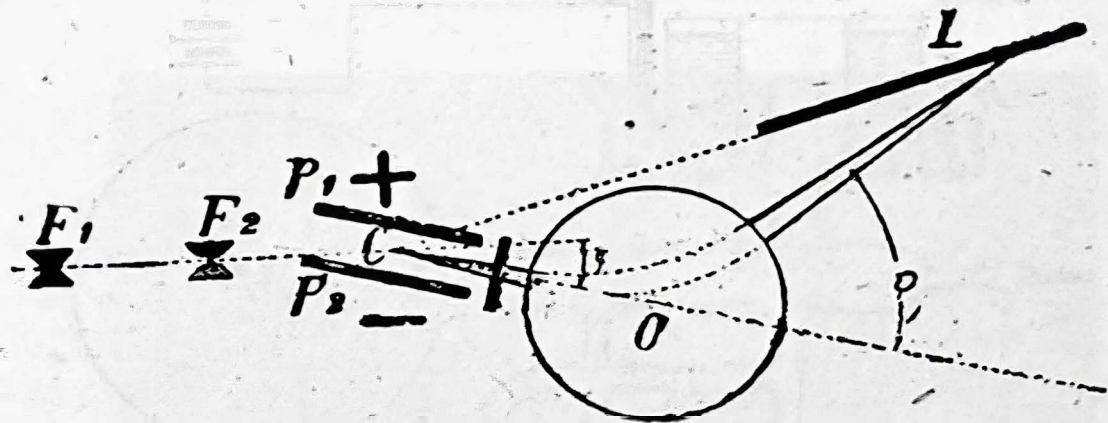


Fig. 10

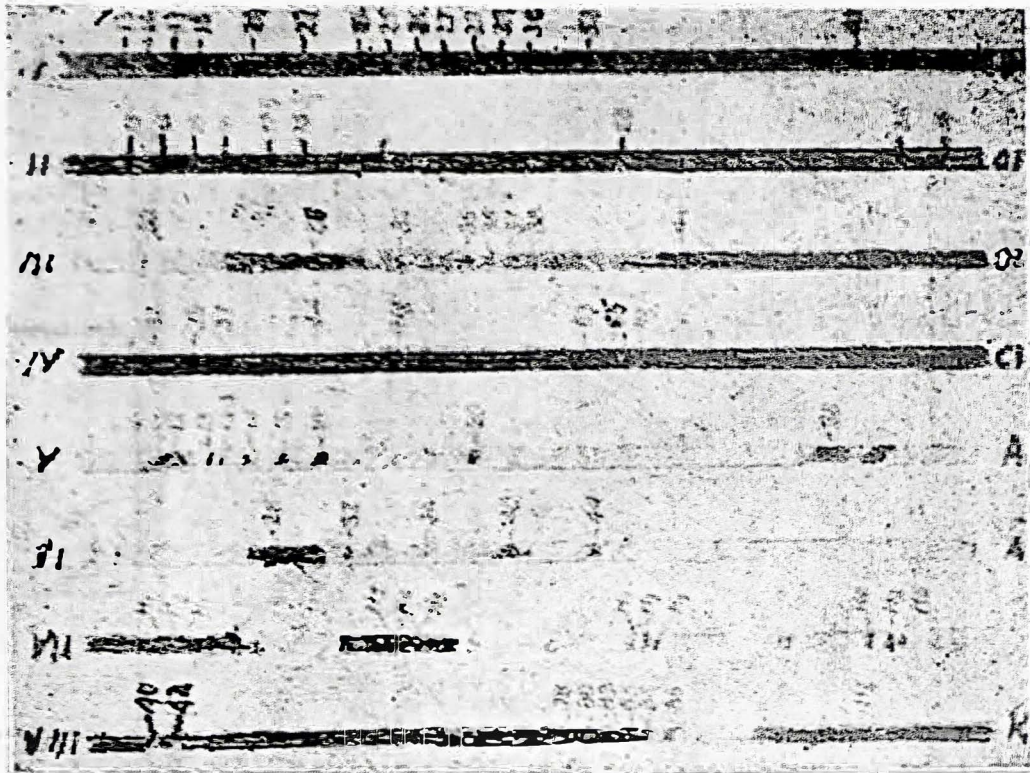


Fig. 11

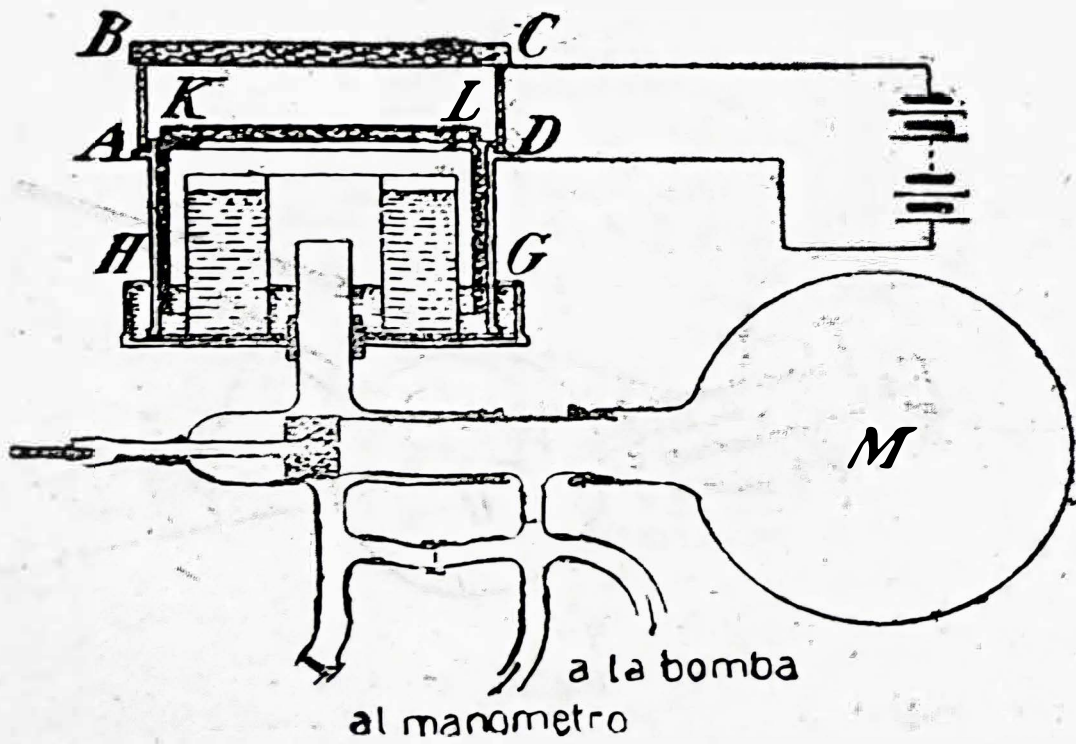


Fig. 12

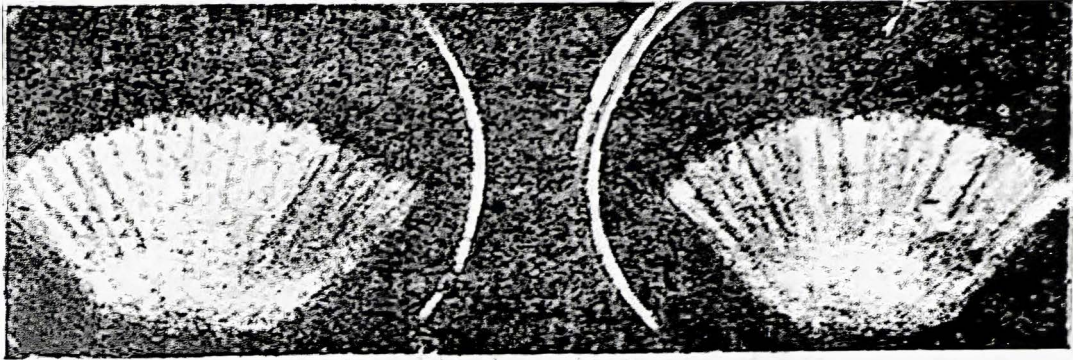


Fig. 13

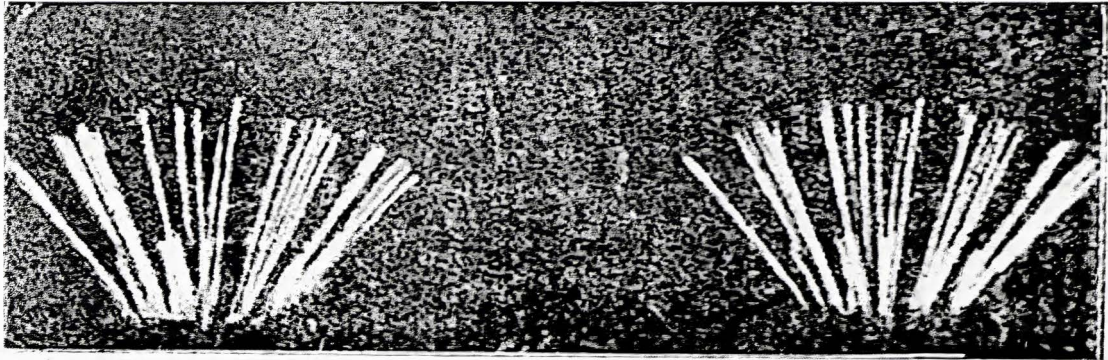


Fig. 14

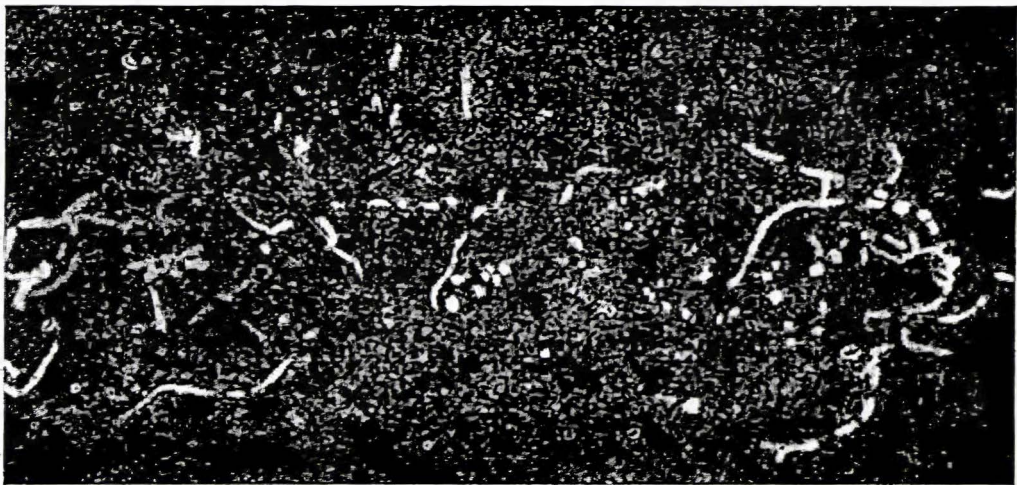


Fig. 15

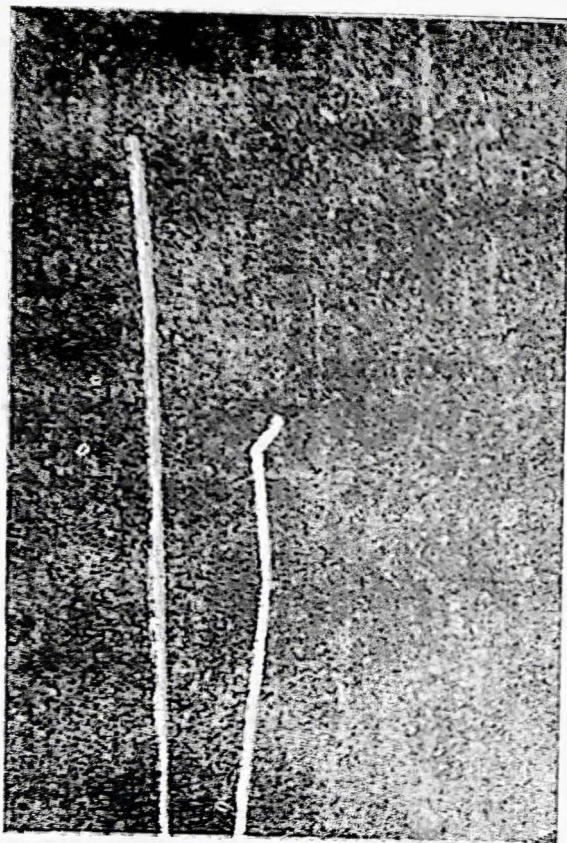


Fig. 16

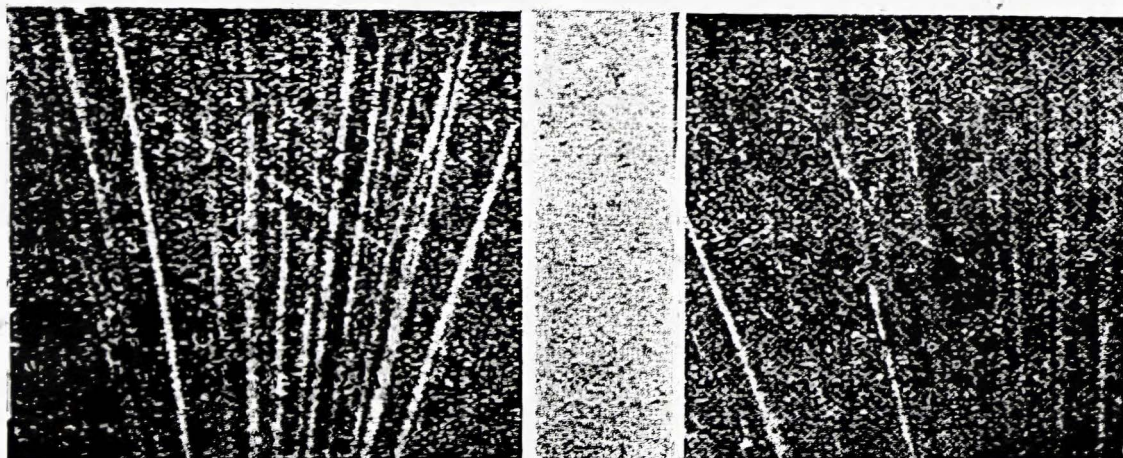


Fig. 17

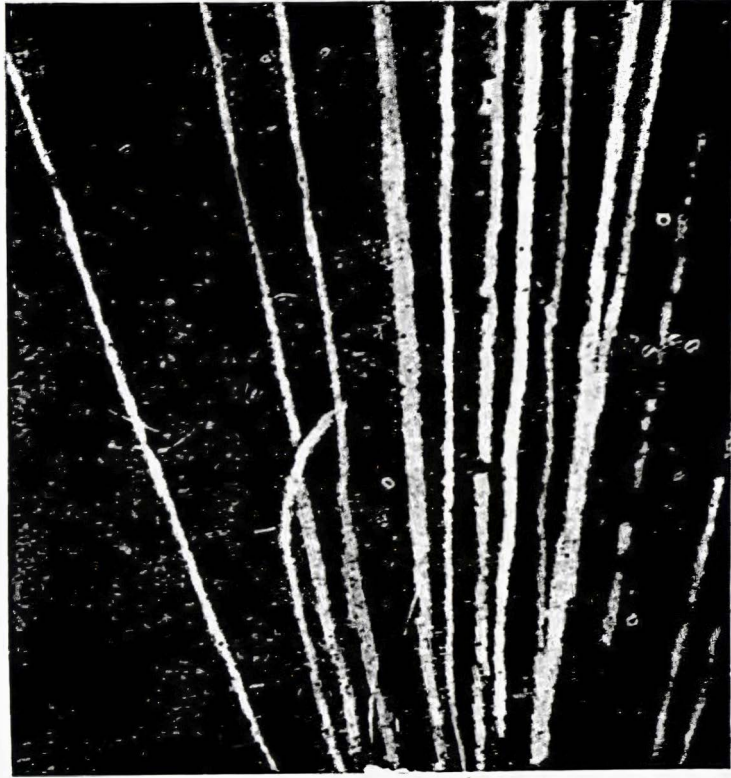


Fig. 18

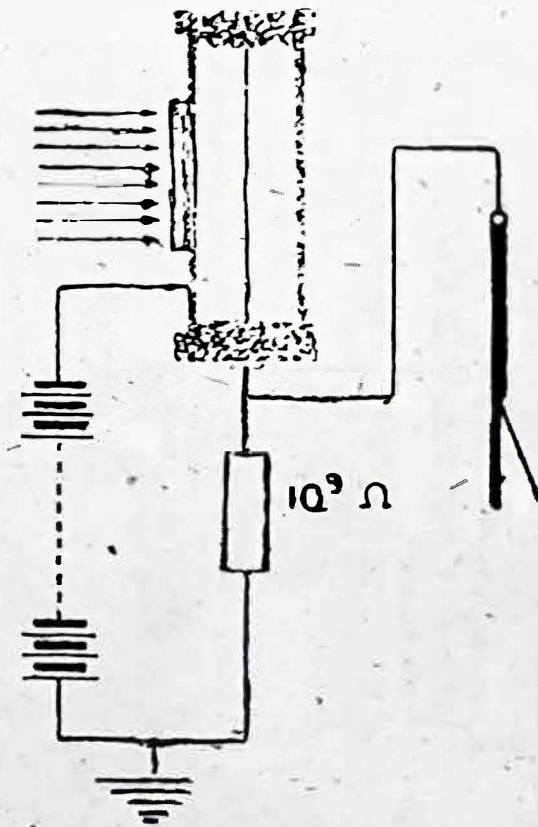


Fig. 19

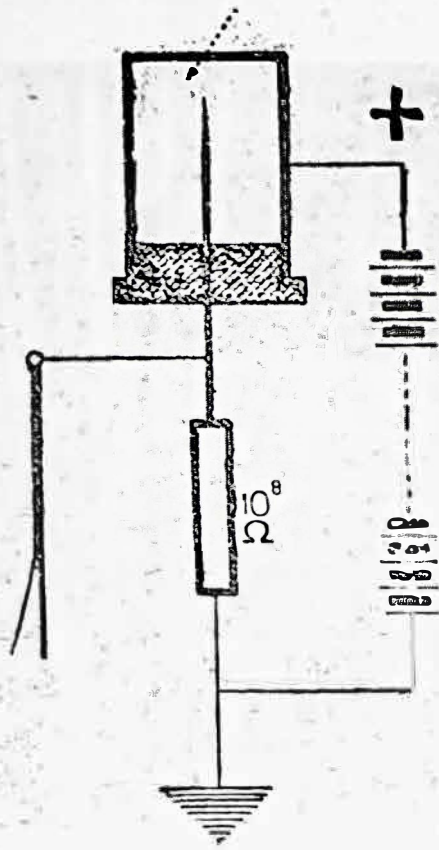


Fig. 20

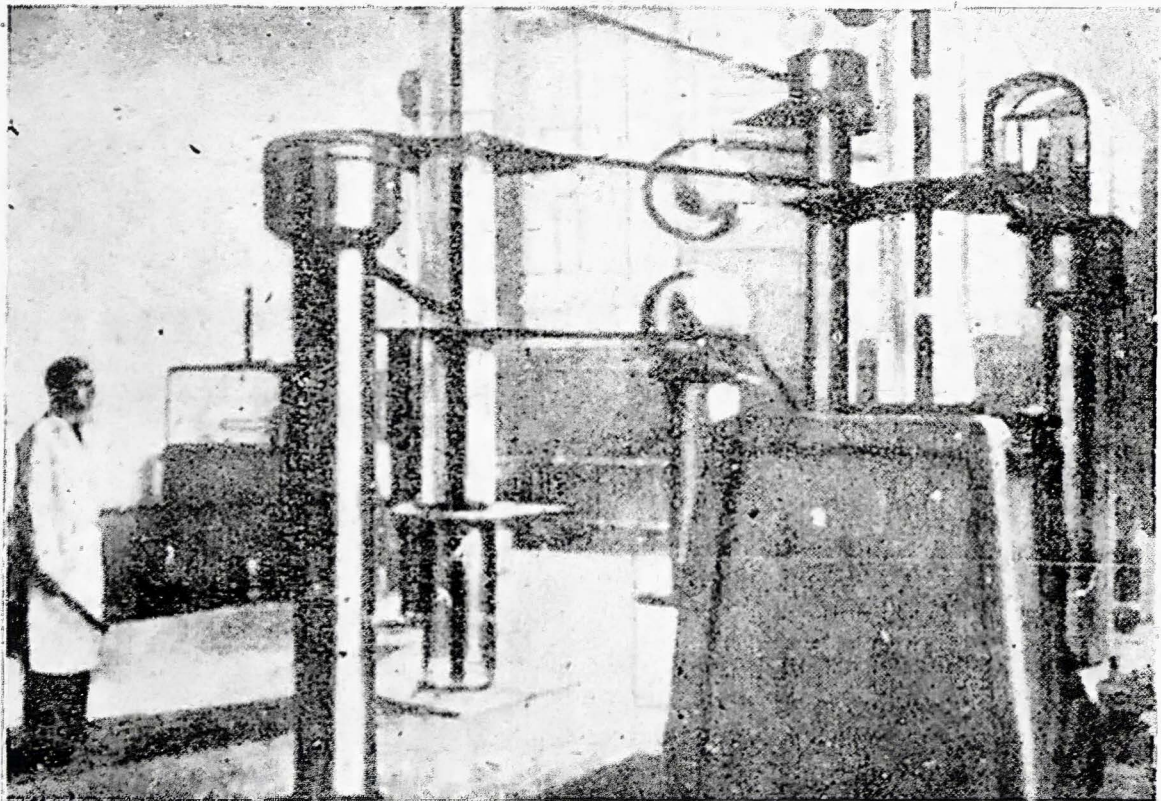


Fig. 21

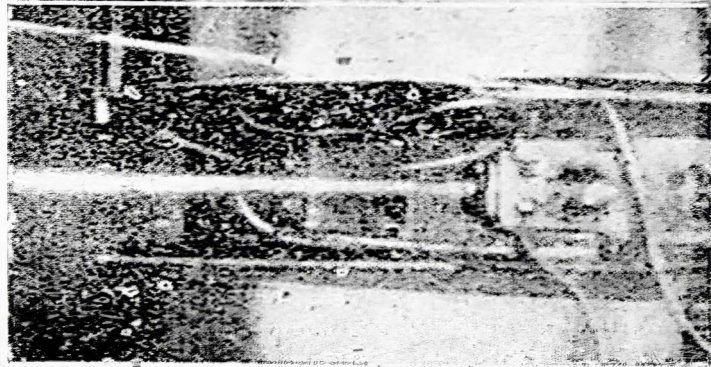
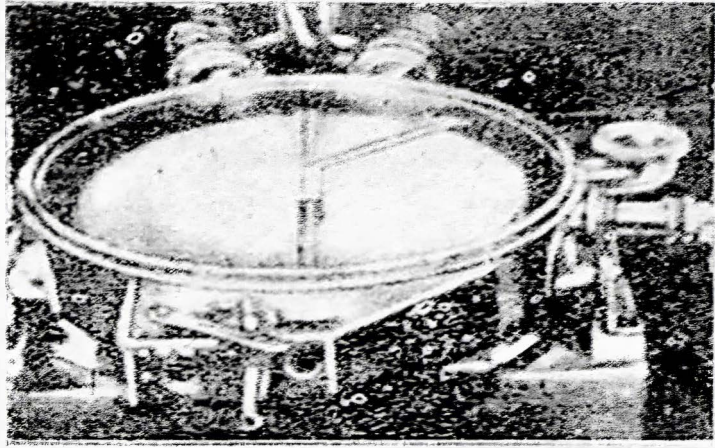


Fig. 22

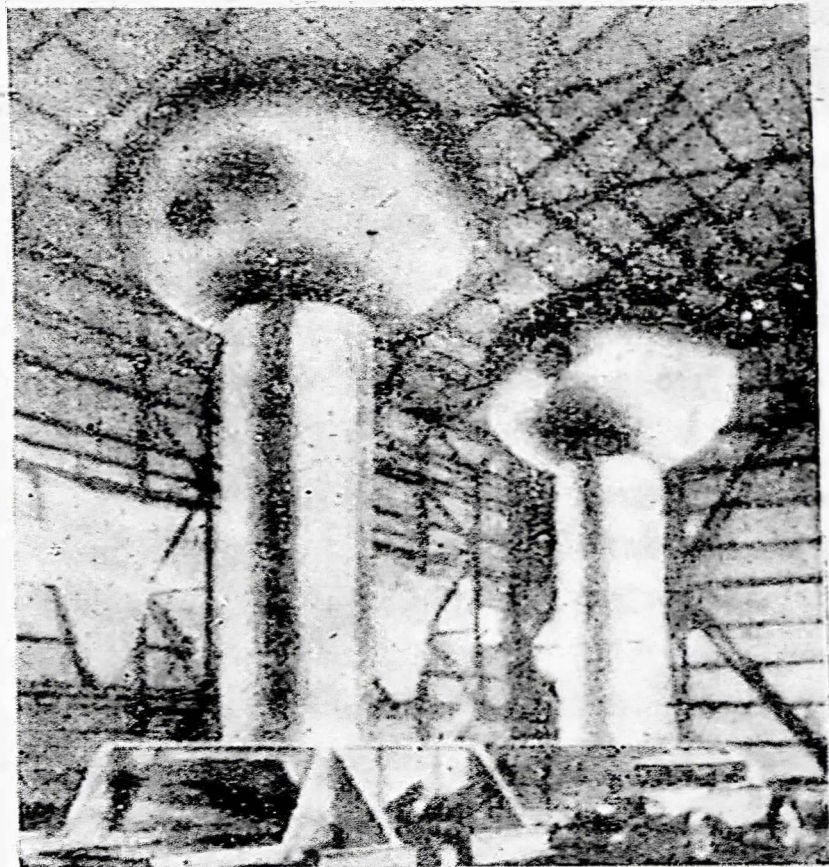


Fig. 23

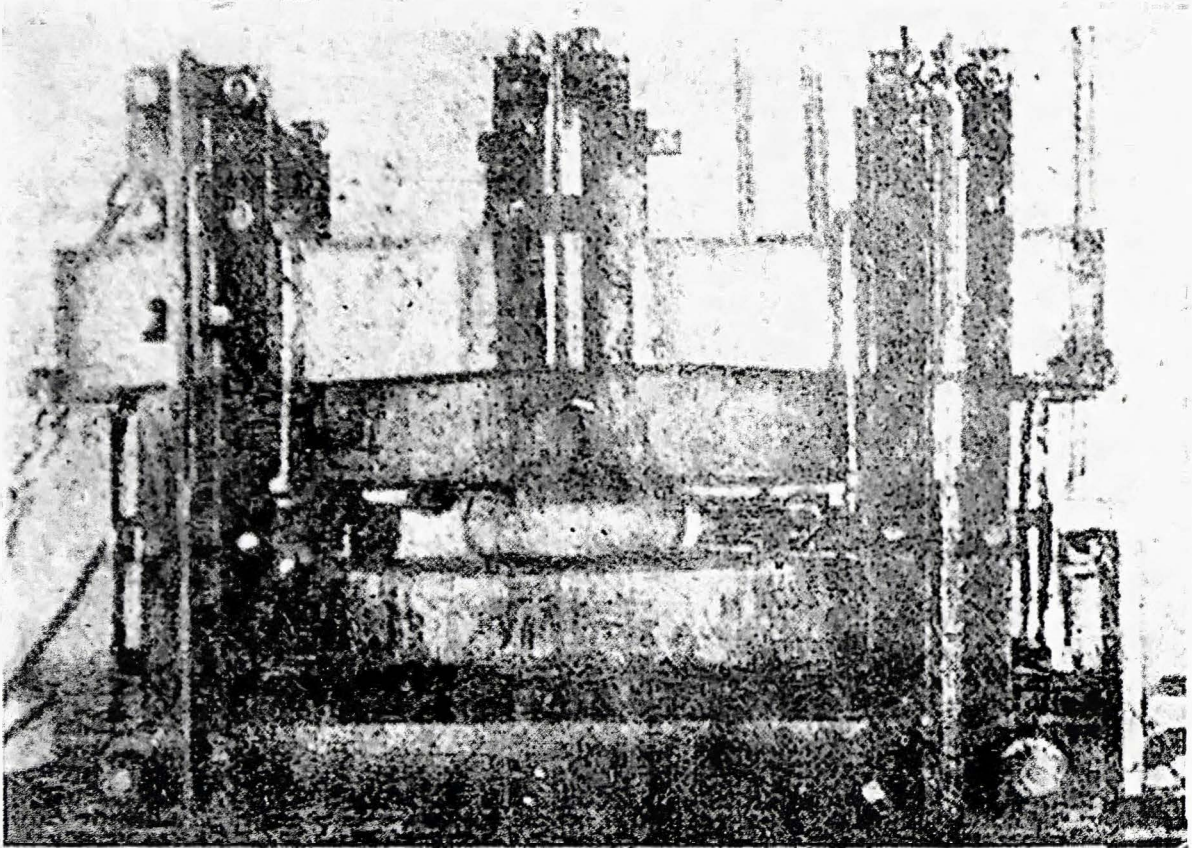


Fig. 24

distancia no puede ser absolutamente disminuída por razones técnicas bien evidentes; en el caso en cambio del cristal la distancia puede considerarse del orden $3/100.000.000$ de cm.

En la Fig. 6 a la izquierda está representada la estructura de la sal gema (Na Cl); las esferas blancas representan a los átomos de sodio, las negras representan los átomos de cloro. Las distancias entre dos iones vecinos es de 2.81 \AA , esto es 2.81 un diez millonésimo de centímetro. A la derecha está representada la sal gema con esferas en contacto para indicar la región ocupada por cada ión en la estructura cristalina.

En la Fig. 7, a la izquierda, está representada la estructura de la calcita (Ca CO_3); las esferas blancas representan los átomos de calcio, las negras los de carbono y los cubos los átomos de oxígeno. La distancia entre los centros de los átomos de oxígeno y calcio es de 2.3 \AA y la distancia entre dos átomos de oxígenos es de 2.3 \AA ; a la derecha está representada la calcita con esferas en contacto para indicar la región ocupada por cada ión en la estructura cristalina.

Los cristales son por lo tanto retículos extremadamente apropiados para los rayos X; y si un haz de rayos cae sobre un cristal, él tiene la posibilidad de difractar el haz de rayos X a pesar de su frecuencia elevadísima, separando las diversas frecuencias.

Por esto, un espectrógrafo para rayos X se puede considerar un espectrógrafo a retículo para radiaciones luminosas, solamente que en lugar del retículo se pone un cristal.

La Fig. 8 muestra la disposición esquemática del tubo productor de los rayos X y del espectrógrafo

para rayos X. El cristal está fijado sobre una plataforma giratoria, los rayos X llegan al cristal a través de dos hendiduras en dos diafragmas de plomo, y los rayos reflejados se registran fotográficamente en una película circular.

También con los rayos X obtenemos un espectro continuo y uno discontinuo representado por líneas paralelas y dispuestas de un modo diferente según el elemento del cual provienen los rayos X.

Estas líneas caracterizan el elemento que los produce, mientras el espectro continuo depende sólo de las condiciones de excitación, esto es de la energía de los electrones usados para el bombardeo de la materia.

Los espectros para rayos X son muchos más sencillos que los espectros luminosos; mientras éstos se componen de centenares y a veces de millares de líneas, en cambio los espectros de rayos X están formados de un pequeño número de líneas que se pueden agrupar en pocas series.

Sobre el espectro continuo, se revelan por lo tanto en la fotografía, líneas bien definidas, que han constituido el objeto de un estudio sistemático y maravilloso por parte de Moseley que ha determinado la ley que relaciona la variación de la frecuencia de una línea dada, con la variación del elemento: Moseley ha podido, con este maravilloso aparato de la Física del Siglo XX, que es el espectrógrafo para rayos X, consolidar el sistema periódico de los elementos con bases teóricas y experimentales que antes de sus investigaciones podía considerarse sólo una adivinación de Mendeleieff.

El espectro de los rayos X está determinado por el número atómico del elemento del cual proviene, e inversamente dado el espectro se puede deducir el nú-

mero atómico de un modo infalible; el espectro de los rayos X basta por sí solo para la determinación precisa de un elemento y para la determinación de su lugar en la clasificación periódica, este lugar coincide con aquel definido por las propiedades químicas del elemento mismo.

Hemos visto así que espectro óptico, o espectro de rayos X, o espectro de radiaciones en general, significa una sucesión de líneas paralelas sobre una placa fotográfica o sobre una pantalla, o sobre un campo visible de un ocular. Estas líneas representan con su posición recíproca las distintas frecuencias que componen la radiación.

* * *

Pero el físico del novecientos no debe estudiar sólo las radiaciones como ya hemos dicho, debe también ocuparse de los corpúsculos elementales cargados de electricidad que constituyen la materia y que pueden ser extraídos de la materia y lanzados en el espacio a gran velocidad.

Son en efecto, las ondas y los corpúsculos que caracterizan las investigaciones científicas modernas.

Se tienen varias disposiciones experimentales que permitan separar de la materia corpúsculos cargados de electricidad.

La descarga eléctrica que se produce en un tubo de vidrio en el cual la presión está suficientemente reducida, desprende del electrodo negativo corpúsculos cargados de electricidad negativa, los electrones, cuya masa es 1845 veces más pequeña de aquella del átomo de hidrógeno.

Son esos mismos electrones, que como hemos dicho, chocando contra un obstáculo producen los rayos X. Ellos constituyen los llamados rayos negativos o catódicos.

Si el electrodo negativo del tubo descrito es perforado; mientras el tubo funciona, en la región a el retrostante vienen preyectados átomos o moléculas de gas residuos cargados de electricidad positiva. Ellos constituyen los así llamados rayos positivos o canales.

Además muchos otros procedimientos se pueden utilizar para producir los rayos catódicos electrones más o menos veloces. Otros métodos han sido inventados para producir corpúsculos materiales cargados de electricidad, rayos positivos o canales.

Ciertas substancias, las radioactivas, expelen espontáneamente electrones velocísimos que constituyen los así llamados (rayos Beta), como asimismo átomos de helio con dos cargas positivas elementales, que constituyen los así llamados (rayos Alfa).

Luego en los procesos de desintegración artificial de la materia, los átomos son descompuestos en partes, también en este caso se tiene la emisión de corpúsculos cargados de electricidad.

La espectroscopía óptica y para rayos X, no nos puede decir nada respecto de la carga de la masa y de la velocidad de estos corpúsculos por cuanto ella no tiene poder sobre los cuerpos no luminosos; y los electrones por ej. cuando son extraídos de los átomos pierden su capacidad de emitir luz, la reconquistan sólo cuando vuelven a un átomo o una molécula. Estas partículas por lo tanto, y en particular, su carga, su masa y su velocidad, deben ser estudiadas de un modo especial; el físico para estas investigaciones debe dejar el espectroscopio para rayos luminosos y rayos

X y crear un espectroscopía apta a estudiar, analizar, la masa y la velocidad de los rayos corpusculares.

Ahora bien, en el mismo modo en el cual se registraban sobre una placa fotográfica las diversas frecuencias de una vibración luminosa o X, por analogía, si sobre una placa fotográfica registramos líneas paralelas producidas por corpúsculos de igual masa e igual carga, pero de diferente velocidad, tendremos un *espectro de velocidad*.

Si en cambio registramos líneas paralelas debidas a corpúsculos de igual velocidad y de igual carga, pero de masa diferente, tendremos un *espectro de masa*.

Para su registro, podemos siempre recurrir a la placa fotográfica, porque por fortuna ella es sensible, tanto si es golpeada por la luz y por los rayos X cuanto si es bombardeada por corpúsculos dotados de energía cinética suficiente.

Pero el principio de dispersión no puede quedar el mismo de aquel aprovechado por la luz y por los rayos X, dado que la refracción y la difracción no se prestan para la separación de los corpúsculos.

El problema en definitiva se reduce a estudiar la disposición apta a dispersar corpúsculos animados de movimiento rectilíneo y velocidad considerables y dotados de cargas eléctricas.

Tal dispersión se obtendrá por medio de campos eléctricos y campos magnéticos.

Los espectrógrafos de velocidad y los espectrógrafos de masa están constituidos o con el solo campo eléctrico, o con el solo campo magnético o con las acciones de los dos campos combinados.

La Fig. 9 representa la disposición de De Broglie para obtener el *espectro de velocidad*. A través de la abertura F. cubierta por una sutil hoja de aluminio

entra en el interior de la caja un haz monocromático de rayos X , que bombardeando una hoja metálica S extrae de ella electrones. Un fuerte campo magnético perpendicular al dibujo hace curvar los electrones fotoeléctricos que salen de S según arcos de circunferencia. Los electrones que así pasan a través de la hendidura H llegan sobre una placa fotográfica en los puntos C o C' según su velocidad inicial. Se obtienen de esta manera sobre la placa fotográfica líneas por medio de las cuales se tiene la posibilidad de determinar la velocidad de los electrones.

Evidentemente la línea C' corresponde a electrones de mayor velocidad de aquellos correspondientes a C .

La Fig. 10 representa en cambio la disposición de Aston para obtener el *espectro de masa*. Los rayos canales o positivos (corpúsculos materiales cargados de electricidad) atraviesan las hendiduras F' y F'' y penetran en el campo eléctrico producido por el condensador cargado P' y P'' , y son desviados; son desviados también por un campo magnético de centro o perpendicular al dibujo de modo que aun teniendo velocidades diversas, si tienen la misma masa llegan a la placa fotográfica L en un punto. Se obtienen así diversas líneas sobre la placa fotográfica correspondiente a los corpúsculos de distinta masa.

Por medio de estas líneas que corresponden al mismo espectro de masa se puede determinar la masa de los distintos corpúsculos.

Aston, por medio de este maravilloso aparato de la física del novecientos, ha podido hacer la importantísima constatación que casi todos los elementos que se consideraban simples, no son tales, pero resultan de la mezcla de átomos de distinta masa.

El espectro de masa de un elemento, dice de un modo inequívoco cuantos son y cuanto pesan los isótopos (así se llaman) del elemento mismo.

El litio por ej. que tiene el peso de 6,94 unidades es la mezcla de dos individuos, uno con peso 6 y el otro con un peso 7 mezclados en diversa proporción.

Así varios experimentadores han verificado, que uno sobre 4,000 átomos de hidrógeno no pesa la unidad, sino el doble. El nuevo hidrógeno, (no debe naturalmente confundirse con la molécula de hidrógeno) no debe naturalmente confundirse con la molécula de hidrógeno que pesa también dos unidades, en cuanto ésta contiene dos electrones, el hidrógeno atómico de peso 2 contiene sólo 1 electrón superficial como el otro.

Dee también ha confirmado recientemente la existencia de un hidrógeno de peso 3. La precisión además que se puede obtener con el espectrógrafo de masa es muy notable, en cuanto al peso de los nuevos átomos que pueden ser puestos en evidencia por el espectrógrafo de masa, que como hemos dicho toman el nombre de isótopos, está dado con la precisión de 1 sobre 10,000.

La Fig. 11 representa los espectros de masa del neon, cloro, argón, criptón, hidrógeno, helio: los números representan las masas registradas.

Se ve así que el espectrógrafo, que en la forma antigua tuvo las funciones de un potente termómetro y ha demostrado ser un delicado y seguro instrumento de análisis químico, en la nueva forma, se ha transformado en un taquímetro y en una balanza de extrema sensibilidad y precisión.

Pero el físico del novecientos no se contenta con medir la masa y la velocidad de los corpúsculos, que son el objeto de su estudio, quiere verlos, quiere ob-

servarlos durante su movimiento, ver su trayectoria, ver lo que sucede cuando uno de estos corpúsculos choca con otro.

No podemos ver los átomos al microscopio, ¿cómo será posible ver, por ej., electrones en movimiento, electrones que como hemos dicho, tienen una masa 1,845 veces inferior del más liviano de los átomos, del átomo de hidrógeno?

Cuando un corpúsculo atraviesa a gran velocidad un gas provoca en su camino una cantidad de desastres; rompe moléculas, desprende de las moléculas del gas cargas eléctricas, en otras palabras, ioniza el gas. Ahora bien, si se verifica una brusca disminución de presión en un recipiente que contiene aire húmedo u otro gas húmedo, el vapor de agua se condensa de preferencia sobre partículas del gas ionizadas. Si el gas se encuentra ionizado solamente a lo largo de una línea sutil, la condensación se produce solamente a lo largo de tal línea, que bajo una intensa iluminación aparecerá como un hilo blanco en un campo obscuro.

En este simple principio está basada la cámara de Wilson, otro maravilloso aparato de la física de hoy que da la posibilidad de ver (en cierto modo) los corpúsculos materiales, su trayectoria, los efectos del choque de algunos de estos corpúsculos con otros, etc.

La Fig. 12 representa la cámara de Wilson. En substancia se trata de un émbolo que puede moverse en el interior de un cilindro de paredes transparentes.

Un rápido descenso de este émbolo produce las condiciones necesarias para la condensación. ABCD es el cilindro de vidrio usado como cámara de condensación; HKLG es el émbolo.

La expansión se verifica cuando se pone en comunicación el espacio debajo del émbolo con el recipiente

M, en el cual la presión ha sido convenientemente reducida.

Con una máquina fotográfica se pueden así fotografiar las líneas de niebla producidas o por partículas alfas (iones de helio veloces) o por partículas beta (electrones rápidos) o por electrones más lentos arrancados de un cuerpo por efecto fotoeléctrico debido al bombardeo de este cuerpo por parte de radiaciones electromagnéticas, etc.; líneas de niebla que representan las trayectorias de estas partículas en cuanto la niebla se produce, como he dicho donde se ha verificado la ionización, esto es donde el haz de las partículas mismas ha pasado.

Las trayectorias son distintas por aspectos y longitud según la masa de las partículas que han ionizado el gas y según su velocidad inicial.

Existen relaciones precisas aptas a deducir la velocidad y la masa de las partículas en función de la longitud y del aspecto de su trayectoria.

Creo oportuno exponer algunas fotografías obtenidas por medio de la cámara de Wilson, por cuanto me parecen muy interesantes:

En la Fig. 13 se ven las trayectorias de los rayos alfa emitidos por el (Thorio B+C+C'). Se ve un rayo de mayor longitud que los otros.

En la Fig. 14 se ven las trayectorias de los rayos alfa emitidos por el (Thorio B+C+C'); en este caso se ven dos grupos de trayectorias diversas.

En la Fig. 15 se ve representada la ionización de aire por efecto de los rayos X; se ven las trayectorias de los electrones producidos.

En la Fig. 16 se ve la ampliación de una trayectoria de partículas alfa, se ve también la desviación de la partícula, después de un choque.

En la Fig. 17, a la izquierda, está representado el choque elástico entre una partícula alfa y un átomo de hidrógeno; y a la derecha está representado el choque elástico entre una partícula alfa y un átomo de nitrógeno.

Y, finalmente, en la Fig. 18 se ve el choque entre una partícula alfa y un átomo de nitrógeno con desintegración de este último. La trayectoria delgada y larga corresponde a un protón extraído del núcleo de nitrógeno, la trayectoria breve y gruesa corresponde a un isótopo del oxígeno.

La cámara de Wilson según las exigencias experimentales y según el experimentador, aun quedando intacto el simple y genial principio sobre el cual está basado, ha adquirido formas muy diferentes; baste notar que en ciertos casos especiales se han constituido cámaras automáticas aptas a producir millares de fotografías en tiempo relativamente breve.

* * *

Pero el incontentable físico del novecientos, no estima suficiente determinar experimentalmente la masa de las partículas que constituyen la materia y que salen de ella por efecto de las más variadas excitaciones, no estima suficiente determinar su velocidad, ver su trayectoria: quiere contarlas.

Y le resulta.

Si los corpúsculos en examen chocan contra una pantalla fluorescente, con el microscopio se puede observar un puntito luminoso allá donde el corpúsculo ha golpeado la pantalla. Pero este método para contar corpúsculos, aun siendo de altísima precisión, es, como bien se comprende, bastante laborioso.

Existe, en cambio, otro método más cómodo, siendo con éste posible registrar el efecto.

Si los corpúsculos a contar son proyectados en el interior de un recipiente metálico que contiene un gas a presión conveniente, cada corpúsculo que entra en el recipiente produce una ionización de gas como se verificaba en la cámara de Wilson; ahora bien, un gas no ionizado, como se sabe, es un mal conductor, pero apenas contiene centros cargados se transforma en un buen conductor; si entonces entre las paredes metálicas del recipiente y otro electrodo central se establece una diferencia de potencial conveniente, en el instante en que se verifica la ionización se produce una corriente eléctrica que puede ser observada con un galvanómetro o también por medio de una variación de tensión señalada por un electrómetro. Las desviaciones de los equipos de este instrumento podrán, con un simple artificio óptico, ser registrados sobre un film que se mueve a una velocidad dada.

La Fig. 19 representa el esquema de un contador de corpúsculos a hilo de Geiger y Muller, que sirve bien para la enumeración de electrones veloces.

La Fig. 20 representa un contador de partículas a punta de Geiger y Klemperer, que sirve bien para la enumeración de corpúsculos materiales.

Las corrientes que se obtienen en la cámara de ionización de los contadores son siempre sumamente débiles, es necesario amplificarlas; se usa para ello un amplificador común de válvulas termoiónicas, y si a la salida de dicho amplificador se coloca un altoparlante, la corriente de ionización de los corpúsculos que atraviesan el contador se transforma en sonido.

Si un contador de Geiger está dotado de un amplificador con altoparlante y está en presencia de un

preparado radioactivo, aun débil se obtiene del altoparlante un bien nutrido tiroteo; son los rayos gama emitidos por el preparado que producen ionización y por consiguiente el sonido en el altoparlante; pero los rayos gama emitidos por el preparado radioactivo son la consecuencia de la desintegración de un átomo de radio, se podría por lo tanto decir que bajo un cierto aspecto el ruido del altoparlante corresponde a la explosión que se verifica cuando un átomo de radio se desintegra.

* * *

Pero el incontentable físico del novecientos, que como hemos visto después de la realización de los espectrógrafos para radiaciones luminosas y X, de los espectrógrafos de velocidad y de masa, ha logrado contar y ver los corpúsculos que componen la materia, que de ella pueden ser expulsados natural o artificialmente por medio de múltiples excitaciones; ha querido usar estos corpúsculos para romper el núcleo atómico para desintegrar la materia con el fin de transformar (cual moderno alquimista) una materia en otra con el fin de poder librar aquella enorme cantidad de energía que la naturaleza ha encerrado en el núcleo atómico. Y lo ha logrado.

El resultado (obtenido con efectos espantosos de la bomba nuclear) lo demuestra.

¿De qué se ha servido?

Se ha servido, cual titánico artillero del bombardeo de la materia por medio de minúsculos pero innumerables y enérgicos proyectiles que podemos considerar subdivididos en dos grandes categorías.

Primera categoría: Los neutrones (partículas que tienen la misma masa del núcleo del átomo de hidrógeno y sin carga eléctrica). Segunda categoría: los corpúsculos con carga eléctrica esto es protones (núcleo de los átomos de hidrógeno), deutones (núcleos de hidrógeno pesado), etc.

Los corpúsculos de la primera categoría no es posible acelerarlos artificialmente, por cuanto están privados de carga eléctrica; los de la segunda categoría en cambio pueden, por medio de oportunos campos eléctricos y magnéticos, ser acelerados y adquirir la energía necesaria para la ruptura, la desintegración del núcleo atómico.

Así que los corpúsculos electrizados pueden ser acelerados, en consecuencia solamente para ellos el hombre ha podido crear los aparatos aptos a su aceleración.

Dado el carácter de esta disertación, creo oportuno limitarme a la exposición esquemática descriptiva y cualitativa de los tipos más importantes de aparatos aceleradores de los corpúsculos electrizados, y precisamente:

El aparato de Cockcroft y Walton.

El ciclotrón de Lawrence y Livingston.

El aparato de Van der Graaff.

Y el Betatrón de Kerst.

El aparato de Cockcroft y Walton, que se ve en su conjunto en la Fig. 21, realizado en 1932 en el Laboratorio de Cavendish en Cambridge, consiste en condensadores cargados en paralelos y descargados en serie; a cada alternancia de la corriente de alimentación se producen, por medio de diodos rectificadores, los cambios en las conexiones, al fin de obtener una diferencia constante de potencial de cerca de 800,000

Volt. Con este aparato los proyectiles usados para la desintegración nuclear son los protones; que como es conocido son los núcleos de los átomos de hidrógeno que se obtienen ionizándolo. Mediante este aparato Cockcroft y Walton pudieron obtener entre otros una impresionante verificación de la ley de Einstein que prevé la posibilidad de una transformación de masa, de materia en energía y viceversa.

El ciclotrón de Lawrence y Livingston, realizado en 1933 en el Laboratorio de Berkeley en California, consiste, como se ve en la Fig. 22, en dos pares de planchas semicirculares cercadas según su diámetro de contorno; normalmente a ellas actúa un campo magnético; un campo eléctrico oscilante, actúa en cambio a través de la ranura diametral que separa los dos pares de planchas. El campo magnético está calculado de modo tal que el tiempo necesario a un proyectil para recorrer una trayectoria semicircular sobre un electrodo, sea igual al período de oscilación, así que cuando un ion ha recorrido un semicírculo, recibe un nuevo impulso en el espacio libre y es obligado a recorrer el otro semicírculo. El ion que corre así con velocidad creciente recorre semicircunferencias de radio siempre mayor; precisamente recorre una espiral en la cual el período es constante siendo la velocidad proporcional al diámetro. Cuando el proyectil ion llega a la periferia de los discos su energía cinética es grandísima y puede así golpear con eficacia la materia y producir la desintegración nuclear. En los primeros aparatos de este tipo se alcanzó fácilmente una energía correspondiente a la tensión de un millón de Volt, actualmente se usan ciclotrones que dan protones o deutones de ocho millones de Volt. Se estaba construyendo últimamente (ahora es muy probable

que esté ya terminado) en el Laboratorio de Física de la misma Universidad un nuevo ciclotrón capaz de obtener partículas, proyectiles con una energía correspondiente a la tensión de cien millones de Volt. Las expansiones polares del campo magnético de este aparato tienen un diámetro de casi cinco metros y el peso total alcanza las cinco mil toneladas.

La Fig. 23 representa en su conjunto el gigantesco generador electroestático construido por el Profesor Robert Van Der Graaff en Round Hull en Massachusetts. Hemos dicho generador electroestático, por cuanto en la base se encuentra una gran máquina electroestática que genera y entrega con continuidad cargas eléctricas positivas y negativas, respectivamente a dos grandes fajas de seda aisladas, las cuales con un movimiento de ascensión producido por un motor las comunican a dos esferas de cuatro metros de diámetro que se ven en el dispositivo. Entre estas esferas, en las mejores condiciones de aislamiento, se verifica una tensión de diez millones de Volt. que viene comunicada a los extremos del tubo acelerador.

Y por último el betatrón de Kerst. Es un acelerador de electrones a inducción apto a producir el equivalente de centenares de millones de Volt. Representa el resultado de un decenio de estudios y de pruebas del físico americano Donal Kerst de la Universidad de Illinois y consiste, como se ve en la Fig. 24, esencialmente de dos partes: Un electromagneto y un tubo anular en el cual se hace el mejor vacío posible. Dentro de este tubo los electrones emitidos por un filamento incandescente catódico giran alrededor de las líneas de fuerzas del intensísimo campo magnético variable del electromagneto con la frecuencia de ciento ochenta períodos por segundo. Se trata en definitiva

de un transformador monofásico *sui generis*, donde el secundario en vez de estar compuesto de una bobina inducida está constituido (séame permitido decir) de electrones libres.

* * *

He tratado de exponer en forma simple, descriptiva cualitativa los medios de indagación experimental usados por la física de hoy, y creo haber dado una idea, cierto nada más que una idea, del valor y de la potencia de las investigaciones científicas modernas.

Hemos visto que es en el campo del atomismo, o sea en el mundo infinitamente pequeño donde la física experimental moderna ha obtenido los más grandes éxitos, pero hemos visto también que estos éxitos han permitido aun en el campo opuesto, esto es, en el mundo estelar, realizar conquistas verdaderamente maravillosas.

Se trata, por lo tanto, de un conjunto de estudios fascinantes en los cuales el hombre, cuya vida tiene la duración de un instante respecto a la inmensidad del tiempo, cuya residencia es un granito de arena perdido en el universo, ha alcanzado con la tormentosa fuerza de la indagación a acercarse, pero sin llegar, como tal vez nunca llegará, a la esencia de la naturaleza.

Deseo insistir, antes de terminar, sobre el concepto, que tal vez nunca se llegará a penetrar la verdadera esencia de la naturaleza, en cuanto no quisiera que los maravillosos resultados experimentales obtenidos por la física de hoy, y ahora sintéticamente expuestos, produjeran una concepción errada sobre la posición, diría filosófica de la física moderna.

Tal vez nunca se llegará a determinar la verdadera esencia de la naturaleza. Esta afirmación que en verdad puede considerarse pesimista es, sin embargo, una de las conquistas más notables desde el punto de vista filosófico de la joven física del novecientos. En efecto, las modernas teorías, esto es, la mecánica de las matrices, la mecánica ondulatoria y la mecánica cuántica, mecánicas que constituyen en realidad aspectos diferentes de una misma teoría y que conducen a los mismos resultados, en unión a las nuevas estadísticas, han renunciado a cualquier modelo geométrico mecánico del átomo y han encontrado el modo de unir entre ellas las diversas magnitudes que caracterizan las radiaciones emitidas por un átomo, esto es, longitud de onda, intensidad, polarización, etc. Así que en dichas mecánicas no se hacen intervenir magnitudes no observables experimentalmente, como, por ejemplo los elementos que caracterizan el movimiento del electrón en el átomo es, decir el período de las revoluciones, el diámetro de las trayectorias, la velocidad, etc. Esta renuncia que se ha demostrado una necesidad de la física moderna, ha significado la liquidación definitiva de la imagen mecánico materialista del universo, que se había desarrollado en la física clásica en forma (me atrevería a decir) insostenible.

En efecto, en la concepción mecánico materialista del universo se afirmaba nada menos que si se conociera en un determinado instante el estado del universo, esto es, si se conociera en un determinado instante de cada átomo, la posición y la velocidad (he aquí el error fundamental en el planteamiento del problema) por medio de las leyes fundamentales de la mecánica y usufructuando de la alta matemática sería posible calcular todos los sucesos futuros como, también, se-

ría posible conocer todos los sucesos pasados no solamente en el campo fenoménico natural, sino también en los hechos históricos y humanos.

Ilusión paradójica.

¡Cada vez que parece haberse alcanzado todo el conocimiento se abren para la ciencia nuevos horizontes.

Aparte del hecho que es, evidentemente, insostenible una teoría mecanística del organismo humano con todas sus desastrosas y necesarias deducciones, primera entre todas la consiguiente negación del libre albedrío, aun la imagen del mundo así científicamente concebido sea también limitadamente al campo puramente fenoménico material, ha sido demostrada errada por la nueva física.

Esta física del novecientos es, por lo tanto, no solamente una de las más bellas y geniales creaciones verificadas durante toda la historia de la ciencia, tanto desde el punto de vista teórico como desde el punto de vista experimental, sino que eliminando un optimismo exagerado y pernicioso, heredado de la física anterior, se ha, en gran manera, mayormente acercado a la esencia de la naturaleza.

La física de hoy tiene, en efecto, como base filosófica una orientación netamente experimental.

Las teorías, según la orientación moderna, deben, *he dicho deben*, elaborar magnitudes físicas, entidades que sean observables o con experiencias factibles o si no factibles por lo menos conceptualmente posibles: en otros términos, los físicos de hoy han logrado demostrar la necesidad de usufructuar en las modernas teorías solamente de magnitudes físicas o entes susceptibles de una definición operativa, que permita con una serie de operaciones físicas conceptualmente posibles de efectuar la medida.

Así que la física de hoy debe abandonar las magnitudes no observables con experiencias factibles o por lo menos, conceptualmente posibles.

Por estas razones la física de hoy ha vuelto plenamente al cuadro de aquel método, que el más grande de los físicos que ha tenido Italia y tal vez el mundo, puso como base de cada investigación científica: el método experimental del sumo Galileo Galilei.