

ó de la de declinación. Si se emplea la primera, se cuidará de hacerla oscilar en el meridiano magnético; si la segunda, se deberá tener en cuenta que no está situada, como la aguja de inclinación, en la dirección misma de la fuerza magnética terrestre, y por consiguiente, que sus oscilaciones dimanen solamente de la acción de la componente horizontal de esta fuerza; mas, en virtud de una sencilla fórmula, se pasa fácilmente de la relación de las componentes á la de las fuerzas mismas.

Esta clase de observaciones se hacen con instrumentos especiales llamados *brújulas de intensidades ó magnetómetros*. Traspasaríamos los límites del plan que nos hemos propuesto si describiéramos estos aparatos así como las operaciones delicadas que su uso requiere. Baste decir que con el magnetómetro bifilar de Gauss se puede medir la componente horizontal de la intensidad magnética terrestre con menos de $\frac{1}{20000}$ de su valor.

Por lo demás, véase, según Humboldt, la historia de las primeras determinaciones científicas de este elemento del magnetismo del globo. "Las oscilaciones, dice, cuya duración da la medida de la intensidad magnética, han llegado á ser por vez primera á fines del siglo XVIII objeto de experimentación, y hasta la primera mitad del XIX no se hicieron indagaciones formales y perseverantes acerca de ellas. En 1723 Graham midió las oscilaciones de su aguja de inclinación para cerciorarse de si eran constantes y averiguar la relación entre la fuerza que las produce y la gravedad. La primera tentativa para valuar la intensidad del magnetismo en puntos de la superficie terrestre muy distantes entre sí, según el número de oscilaciones efectuadas en un tiempo dado, la hizo Mallet en 1769, y con aparatos bastante imperfectos vió que

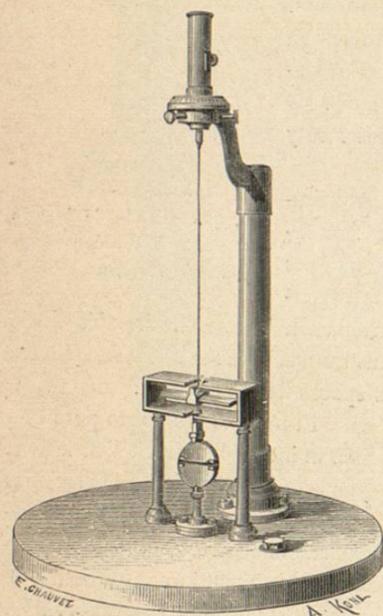


Fig. 48. — Aparato anotador de la declinación magnética en el observatorio de Kew

dicho número era exactamente el mismo en San Petersburgo, situado á los $59^{\circ} 56'$ de latitud, que en París, situado á los $48^{\circ} 50'$; de donde nació la creencia, que ha subsistido hasta Cavendish, de que la intensidad de la fuerza terrestre es igual en todas las zonas.,

Lemonnier y Borda no incurrieron en este error, que las observaciones de Lamón (1785-87) y luego las de Humboldt (1798-1829), hechas en las regiones equinociales del Nuevo Mundo y del Asia central, rectificaron en breve.

Posteriormente se han reunido en todos los puntos del globo observaciones continuas de la intensidad magnética y de los otros dos elementos del magnetismo terrestre. Gracias á la fundación de observatorios especiales y al empleo de instrumentos anotadores, se ha podido abarcar el conjunto de los fenómenos y estudiar al propio tiempo las leyes de sus variaciones.

Entremos en algunos detalles acerca de este punto.

La observación directa de los elementos magnéticos con los aparatos que acabamos de describir requiere mucho tiempo y atención, y no puede por otra parte dar los valores de estos elementos sino á intervalos más ó menos distantes entre sí. En los obser-

vatorios especiales se observa á horas determinadas, por ejemplo á las seis de la mañana, al mediodía, á las seis de la tarde y á las doce de la noche.

Pero de algún tiempo á esta parte se ha instalado en los principales observatorios astronómicos aparatos anotadores, con los cuales se puede conocer sin interrupción, día y noche, las variaciones de la declinación, de la intensidad horizontal y vertical, y por consiguiente de la inclinación.

Demos una idea, guiándonos por Gordón, de los aparatos anotadores que posee el observatorio astronómico de Kew. He aquí el principio en que están basados dichos aparatos.

"Un espejo fijado en el imán movable refleja el rayo de luz de una lámpara en una tira de papel fotográfico sensible, movida de un modo continuo por un mecanismo de relojería.

„Si el imán está en reposo, el trazo es una línea recta; si en movimiento, es una línea sinuosa. Se observan tres elementos: la declinación, la fuerza horizontal y la vertical. De la relación de las dos últimas se puede deducir la inclinación, por lo cual no se la observa directamente.

„Las figuras 48 y 49 presentan el aspecto de las porciones del aparato anotador que sirven para la declinación y para la fuerza horizontal.,

Limitémonos á describir la parte del aparato que inscribe la declinación.

"Consiste en un imán suspendido, al cual está fijado un espejo: el imán pende de un solo hilo, como en el magnetómetro unifilar. El aparato está situado sobre una piedra maciza. La luz de una lámpara de gas atraviesa la ranura y la lente de un colimador, da en el espejo y se refleja en él al través de un tubo de madera, hasta en la caja que contiene los cilindros y un aparato de relojería. La luz da en uno de los cilindros horizontales, á cuya superficie hay adaptada una hoja de papel impresionable. Si el cilindro estuviera en reposo y el imán en movimiento, se inscribiría en el cilindro una línea negra paralela á su eje, cuya longitud correspondería con los movimientos extremos del imán. Si éste permaneciera fijo mientras el cilindro gira, se inscribiría alrededor de éste una línea recta perpendicular al eje. Pero si el mecanismo de relojería imprime al cilindro un movimiento de rotación continuo, y si el imán oscila al propio tiempo, la línea inscrita alrededor del tambor es una curva irregular ó una línea sinuosa; la distancia de cualquiera de sus puntos á la línea de base da la dirección del meridiano magnético en el instante correspondiente.,

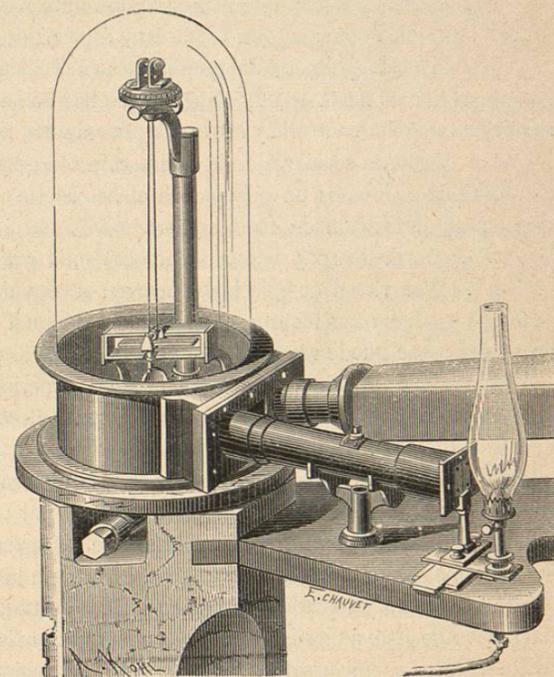


Fig. 49. — Anotador de la fuerza horizontal

IV

VARIACIONES PERIÓDICAS DE LOS ELEMENTOS DEL MAGNETISMO TERRESTRE: INCLINACIÓN, DECLINACIÓN É INTENSIDAD

A pesar del descubrimiento de la declinación, creyóse por espacio de mucho tiempo que la aguja imanada se dirigía al Norte; y en realidad hace más de dos siglos que aquélla era nula en Europa, como lo era, por ejemplo, en Londres en 1657 y en París en 1666. Anteriormente á estas épocas, la declinación era oriental en ambas regiones, y las observaciones prueban que había ido disminuyendo de una manera constante.

Pero tanto en París como en Londres, y á partir de 1666 ó 1657, la aguja declinó poco á poco al Oeste, y de oriental que era pasó á occidental, adquiriendo valores sucesivamente crecientes hasta 1814 y 1815 en que llegó á su máximum. Después ha vuelto á seguir una marcha contraria y retrocede poco á poco hacia el meridiano astronómico.

Estas variaciones seculares de la declinación son generales en toda la superficie del globo terráqueo. Citemos un ejemplo en el hemisferio austral: en el Cabo de Buena Esperanza la declinación en 1605 era oriental é igual á $0^{\circ} 30'$, algunos años después era nula, y á partir de 1609 volvía á ser occidental para llegar en 1791 al máximum de $25^{\circ} 40'$. ¿Y en virtud de qué leyes ocurren estas variaciones? ¿Sus amplitudes son las mismas en diferentes lugares y sus períodos de igual duración? Preguntas son estas á las cuales no se puede responder aún, dado el estado actual de la ciencia.

Aparte de las variaciones seculares, la aguja experimenta en su dirección cambios periódicos anuales y también variaciones diurnas. Entremos en algunos detalles acerca de estos dos puntos.

Las variaciones diurnas, observadas por vez primera en Luvo (reino de Siam) por Hellibrand y el padre Tachard, fueron estudiadas por Graham desde 1722. He aquí, según Humboldt, cuál es la marcha horaria de la aguja: "En las latitudes medias del hemisferio magnético boreal, la extremidad Norte de la aguja imanada se inclina más al Norte á las ocho y cuarto de la mañana. Desde esta hora hasta las dos menos cuarto se mueve de Este á Oeste hasta llegar á su punto más occidental. Este movimiento de Este á Oeste es universal respecto de todas las regiones del hemisferio septentrional, ya sea occidental la declinación como en toda Europa, Pekín, Nertschinsk y Toronto en el Canadá, ó ya oriental como en Kasán, Sitka en la América rusa, WASHINGTON, Marmato en Nueva Granada y Payta en la costa del Perú. A partir de la una y cuarto y del punto más occidental, la aguja imanada emprende de nuevo su marcha al Este durante la tarde y una parte de la noche hasta las doce ó la una de la madrugada, haciendo con frecuencia una breve pausa á eso de las seis de la tarde. Durante la madrugada, retrograda un poco al Oeste hasta que llega á su desviación mínima, ó en otros términos, á su punto de parada oriental, de las ocho y cuarto."

Pero estas horas no son exactamente las mismas para todos los países, ni iguales las amplitudes de las oscilaciones. De las observaciones hechas en Montsouris se ha deducido que la hora del máximum del mediodía es algo más cerca de las doce en invierno que en verano; el mínimum de la mañana algo más cerca de las ocho en invierno y de las siete en verano. Por lo que hace á la amplitud de la variación diurna, llega á $15'$ en las altas latitudes (10 por término medio en París), para bajar á $3'$ y $4'$ en las inmediaciones del ecuador magnético. Por último, se ha reconocido también que los movimientos horarios de la aguja imanada se efectúan en el hemisferio austral lo

mismo que en el boreal; las máxima y las mínima ocurren á las mismas horas, aunque con la diferencia fundamental de que si el extremo Norte de la aguja se dirige al Oeste en el hemisferio boreal, se desvía hacia el Este en el austral y recíprocamente.

La declinación también cambia relativamente á un mismo lugar, según la época del año ó según las estaciones. He aquí cómo se procede para comprobar estas variaciones. De las observaciones horarias que se hacen diariamente se deduce el promedio del día, y luego se toma el de las declinaciones de los días de cada mes. La comparación de estos promedios mensuales ha hecho ver que la declinación marcha al Oeste de mayo á septiembre en las estaciones boreales, al paso que retrograda al Este durante los demás meses del año. Lo contrario sucede en las estaciones del hemisferio austral. Si se comparan las amplitudes de la variación secular y las de la anual, se advertirá entre ellas tal concordancia, que Arago ha deducido que crecen y disminuyen al mismo tiempo.

Cassini, Gilpin y Beaufoy reconocieron y estudiaron por primera vez las variaciones anuales de la declinación á fines del siglo XVIII.

La inclinación experimenta, como la declinación, variaciones periódicas seculares, anuales y diurnas. Hay consignadas observaciones hechas en Londres y en París desde el año 1576, y lo mismo en una capital que en otra se ha notado una disminución constante de la inclinación; en Londres ha parecido aumentar al principio entre los años 1576 y 1723, pero no debemos olvidar que entonces eran poco exactos los procedimientos de medición. De 1671 á 1879, el promedio en París es de $2',7$ por año; el de los diez últimos años, de $2',1$. En Londres, si se cuenta la disminución desde 1723 hasta 1879, el término medio es de $2',7$ como en París.

Según Hansteen, el promedio de un gran número de observaciones da para la inclinación un valor de $15'$ más en verano que en invierno. El mismo físico ha comprobado que sufre también variaciones diurnas, y por la mañana es de $4'$ á $5'$ mayor que por la tarde.

¿La intensidad de la fuerza magnética varía también con el tiempo?

Cuestión es esta tan delicada como difícil de resolver mediante la comparación de las oscilaciones de una misma aguja imanada en diferentes épocas, pues es sabido que el estado de imanación está sujeto á variaciones que no dan la seguridad de que la aguja conserve su fuerza magnética gran número de años.

Con todo, Poisson ha indicado un método que Gauss ha perfeccionado, y según el cual se puede medir la intensidad absoluta del magnetismo terrestre sin necesidad de tener en cuenta la fuerza magnética de las agujas empleadas: el resultado de sus observaciones, hechas en Göttinga, ha sido negativo. Por otra parte, Hansteen ha observado variaciones diurnas y mensuales de la intensidad ó por lo menos de su componente horizontal, que parecen concordar con las variaciones de la inclinación; pero este resultado tampoco prueba que haya habido cambios efectivos en la intensidad absoluta. Finalmente, de las observaciones hechas en Kew y en Greenwich ha resultado que hay en efecto una variación secular de este elemento. Al paso que la *fuerza horizontal* va creciendo, la total disminuye, por el contrario, de año en año.

He aquí algunas cifras en apoyo de esta conclusión:

| Años | Fuerza horizontal | Fuerza total |
|---------------|--------------------|--------------------|
| 1848. | 1,716 en Greenwich | 4,791 en Greenwich |
| 1866. | " — | 4,740 — |
| 1867. | 1,776 — | " — |
| 1879. | 1,797 en Kew | 4,736 en Kew |

V

PERTURBACIONES ACCIDENTALES DE LA AGUJA IMANADA

Además de las variaciones periódicas que acabamos de describir, la aguja imanada experimenta accidentalmente oscilaciones bruscas, perturbaciones cuyas causas se desconocen todavía, si bien sólo duran muy poco tiempo, y que se caracterizan llamándolas *tormentas magnéticas*. "A consecuencia de la extensión dada á la navegación, dice Humboldt, y de la aplicación de la brújula á las mediciones geodésicas, advirtiéronse desde luego perturbaciones extraordinarias en la dirección de la aguja imanada, acompañadas de oscilaciones, temblores y estremecimientos, y se adquirió la costumbre de achacar este fenómeno á un estado particular de la aguja que se designó de una manera muy característica en el lenguaje marítimo francés, diciendo que estaba *loca*."

Dase el nombre de *tormentas magnéticas* (*magnetic disturbances, magnetic storms*) á esas perturbaciones que coinciden á menudo, según más adelante veremos, con las auroras polares, y también con los terremotos, las erupciones volcánicas y las lluvias de estrellas fugaces.

Estas variaciones accidentales afectan más en particular á la aguja de declinación; rara vez se notan movimientos de báscula en sentido vertical, oscilaciones de la aguja de inclinación. La amplitud de las oscilaciones suele ser menor de un grado; Humboldt observó desviaciones de 14' á 18', cada una de las cuales duraba de 1 1/2 á 3 segundos. Pero con frecuencia "la amplitud y la desigualdad de las oscilaciones que excedían con mucho de las divisiones de la señal (Humboldt observaba la aguja desde lejos con un telescopio que tenía en su foco una mira é hilos cruzados), ya á un lado, ya á los dos, imposibilitaban toda observación."

Aunque se trate aquí de fenómenos accidentales, se distinguen sin embargo en las tormentas magnéticas regresos periódicos á horas y á épocas determinadas; son doble más frecuentes y fuertes de día que de noche, como también lo son en los meses de verano, de abril á septiembre, más que en los de invierno del hemisferio septentrional (observaciones de Sabine en Toronto). En el austral (Hobarton) su mayor frecuencia ocurre en los meses de septiembre y abril, es decir, durante el invierno. Humboldt observó en Berlín que las tormentas magnéticas más violentas y numerosas ocurrían hacia las tres de la mañana y cesaban á las cinco. En Santa Elena y en el Cabo de Buena Esperanza lo son en la época de los equinoccios.

Otra circunstancia notable es la simultaneidad de las tormentas magnéticas en todas las regiones del globo, en puntos separados por muchos millares de leguas de distancia: por ejemplo, la tormenta magnética del 25 de septiembre de 1841, que se observó á la vez en el Canadá, en Bohemia, en el Cabo de Buena Esperanza, en la Tierra de Van Diemen y en Macao. Recordando Humboldt este hecho, cita otros casos en que las perturbaciones son puramente locales, como las que observó en Berlín en 1829 y que no pudieron propagarse hasta París, en donde Arago hacía observaciones simultáneas con instrumentos semejantes á los de aquel físico, ni siquiera hasta Freiberg, en donde Reich hacía sus observaciones de magnetismo subterráneo en un pozo de mina.

Acabamos de resumir sucintamente cuanto se sabe acerca de las variaciones periódicas de los elementos magnéticos así como de sus perturbaciones accidentales. Réstanos exponer las hipótesis que se aducen para explicar sus causas.

Si se considera el globo terrestre como un imán con dos polos, según la hipótesis

emitida por primera vez por Gilbert, hay que admitir que este imán no es fijo, y entonces se presentan dos maneras de explicar esta variabilidad: la de Halley, quien suponía que el núcleo magnético interno estaba arrastrado por una lenta rotación, de la cual dimanaban los cambios seculares de declinación é inclinación de la aguja imanada; y la de Æpinus, que consideraba fijo el núcleo, pero de estado magnético variable.

Lo cierto es que las variaciones anuas ó mensuales y las diurnas están enlazadas con los períodos terrestres, con los dos movimientos de traslación de la Tierra alrededor del Sol y de rotación sobre su eje. Como de aquí resultan cambios de período igual en la temperatura de la superficie terrestre y además se sabe que la imanación ó la fuerza magnética depende también de la temperatura, Duperrey suponía que las variaciones de la aguja imanada reconocían por causa la acción calorífica del Sol. Biot las atribuía á una acción específica del Sol considerado como cuerpo magnético, con lo cual asimilaba nuestro globo á un cuerpo sometido á un magnetismo pasajero por influencia.

Ampère basaba toda una teoría del magnetismo terrestre en la existencia de corrientes eléctricas ocultas en la superficie del globo y dirigidas de Este á Oeste. Valiéndose de esta hipótesis explicaba la dirección general de la aguja imanada así como sus variaciones diurnas y anuas en los diferentes puntos del globo; la presencia del Sol debajo del horizonte y su altura en las varias épocas del año bastaban, según él, para explicar las modificaciones experimentadas por las corrientes, y por consecuencia los cambios de la aguja imanada. Por lo que respecta á las variaciones accidentales ó perturbaciones, no parece dudoso que están en conexión con un fenómeno que describiremos en el capítulo siguiente, ó sea el de las auroras polares. Admítase hoy generalmente que este fenómeno es de origen magnético, y que las perturbaciones de la aguja imanada y las auroras parecen así efectos de una misma causa, más bien que fenómenos que se engendran recíprocamente. Pero falta conocer esta causa.

¿Es inherente á la Tierra ó bien de origen cósmico, como inducen á hacerlo creer las coincidencias reconocidas entre los períodos de frecuencia de las auroras y de las perturbaciones magnéticas y los de las manchas y protuberancias del Sol? Sabine, Gautier y Wolf descubrieron casi simultáneamente en 1852 esta conexión entre los fenómenos magnéticos terrestres y los accidentes de la superficie solar. El cuadro siguiente, formado por el docto americano E. Loomis, pone de manifiesto la coincidencia de las épocas de máxima y mínima relativamente á estos distintos fenómenos, y las observaciones de Respighi y de Tacchini confirman el hecho de que las protuberancias hidrogenadas del Sol siguen, por este concepto, la misma ley que las manchas:

| EPOCAS DE LAS MÁXIMA DE LAS | | | EPOCAS DE LAS MINIMA DE LAS | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------|
| Manchas solares | Amplitudes de las variaciones diurnas | Auroras boreales | Manchas solares | Amplitudes de las variaciones diurnas | Auroras boreales |
| 1778 | 1777 | 1778 | 1784 | 1784 | 1784 |
| 1788.5 | 1787 | 1787.5 | 1798 | 1799.5 | 1798 |
| 1804 | 1803 | 1804.5 | 1810 | — | 1811 |
| 1816.5 | 1817.5 | 1818 | 1723 | 1823.5 | 1823 |
| 1829.5 | 1829 | 1830 | 1833.5 | — | 1854.5 |
| 1837 | 1838 | 1840 | 1843.5 | 1844 | 1843.5 |
| 1846.5 | 1848.5 | 1850.5 | 1856.5 | 1856 | 1856 |
| 1860 | 1838.5 | 1859.5 | 1817 | 1867 | 1867 |
| 1870 | 1870.5 | 1870.8 | | | |

Secchi ha consignado la misma coincidencia entre la amplitud de la variación diurna y las manchas solares, con respecto á la serie de años de 1859 á 1865. Gordón, en su *Tratado experimental de electricidad y de magnetismo*, cita el caso siguiente: "En 1859, una tempestad magnética, sin precedente por su magnitud, duró desde el 28 de agosto hasta el 7 de septiembre. El profesor Balfour Stewart hizo notar que coincidía con el período de actividad de una de las mayores manchas solares que se han observado.", Un individuo de la Sociedad Real de Londres ha publicado en 1875 una Memoria sobre las variaciones del promedio diurno de la fuerza horizontal del magnetismo, del cual dedujo que estas oscilaciones están en relación con los tres períodos de 26, 29,5 y 27,3 días, que son las duraciones respectivas de la rotación del Sol sobre su eje y de las revoluciones sinódicas y trópicas de la Luna.

Acabamos de enumerar, sin comentarlas, las hipótesis que se han propuesto para explicar las variaciones periódicas así como las perturbaciones accidentales de la aguja imanada.

En nuestra opinión, antes de decidir, con pleno conocimiento de causa, acerca del grado de confianza que merecen, se han de comparar y discutir nuevas series de observaciones hechas con los aparatos perfeccionados de que se sirven hoy los observatorios magnéticos y efectuadas simultáneamente en varias regiones del globo.

Hasta entonces sólo podrán hacerse conjeturas más ó menos probables sobre las causas que producen esos fenómenos de tanto interés para la física terrestre.

VI

DISTRIBUCIÓN DEL MAGNETISMO EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. — LÍNEAS ISÓGONAS É ISODINÁMICAS

Supongamos que el número de estaciones en que se pueden observar y determinar con precisión los elementos magnéticos sea bastante considerable en la superficie de la Tierra para tomar nota de todos los cambios algo importantes que experimentan cuando se pasa de un punto á otro. Figurémonos que tras un año entero de observaciones simultáneas se haya calculado y reducido todos los promedios horarios, diurnos y mensuales, y el resultado definitivo será, para el año, el conjunto de los valores de la declinación, inclinación é intensidad magnéticas en la superficie entera del globo terráqueo y en cada uno de sus puntos.

Este estado, esta distribución del magnetismo en nuestro planeta serían propios de la época considerada; pero claro está que si andando el tiempo, y en la sucesión de los años y de los siglos, se quisieran seguir las fluctuaciones que en ella causan las variaciones de que anteriormente hemos hablado, variaciones seculares, anuas, diurnas, y también perturbaciones accidentales, el cuadro de esta distribución magnética estaría en movilidad perpetua, y su estudio sería sin duda extraordinariamente complicado. Pero podemos limitarnos á las variaciones seculares, las cuales, efectuándose con gran lentitud, permiten abarcar de una sola ojeada el estado magnético del globo. Con un sistema de líneas que vamos á definir se obtiene una representación gráfica de este estado que hace su estudio mucho más fácil de lo que lo harían los muchos cuadros numéricos en que los físicos hubieran consignado sus observaciones.

Dase el nombre de *polos magnéticos* á los puntos del globo en que la inclinación es igual á 90° , ó lo que es lo mismo, á los puntos en que la fuerza horizontal es nula. La aguja imanada de inclinación está por consiguiente vertical en dichos puntos, que por

cierto no deben confundirse con los de la mayor intensidad magnética. Hay dos polos magnéticos, uno situado en el hemisferio boreal y otro en el austral, y ambos se hallan á distancia desigual de los polos de rotación ó geográficos. He aquí, según Humboldt, la historia de su descubrimiento: "A la osadía y á la actividad científica de un solo navegante somos deudores de nociones precisas sobre la situación de los dos polos magnéticos. Sir James Ross ha determinado el sitio del polo Norte durante la segunda expedición de su tío sir John Ross, de 1829 á 1833; la del polo Sur, durante la expedición

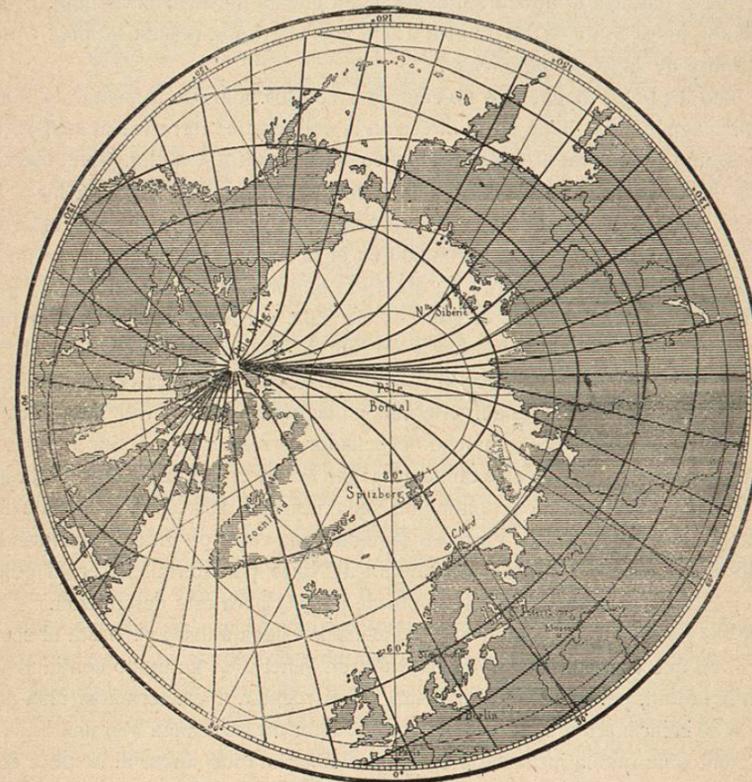


Fig. 50. — Carta de los meridianos y paralelos magnéticos del globo terráqueo en las regiones polares boreales

antártica que él mismo mandó, de 1839 á 1843. El polo Norte magnético, situado á los $70^\circ 5'$ de latitud y á los $99^\circ 5'$ de longitud occidental, está 5 más distante del polo de rotación de la Tierra que el polo Sur magnético, situado á los $75^\circ 5'$ de latitud y $151^\circ 48'$ de longitud oriental. La diferencia de las longitudes entre los polos magnéticos es de 109 grados. El Norte se halla en la gran isla Boothia Félix (fig. 50), contigua al continente americano, la cual forma parte del país llamado en un principio North Somerset por el capitán Parry; está á corta distancia de la costa occidental de la isla, cerca del promontorio Adelaida que avanza entre King William's Sea y Victoria Street. No ha sido posible llegar directamente al polo Sur, como se había llegado al Norte. El 17 de febrero de 1841 estaba el *Erebus* á los $76^\circ 12'$ de latitud austral y $161^\circ 40'$ de longitud oriental. La inclinación no era todavía más que de $88^\circ 40'$, de lo cual dedujeron los navegantes que estaban á 160 millas marinas inglesas del polo magnético aus-