

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

EL GEOMAGNETISMO CIENCIA EN PROGRESO

DISCURSO

LEIDO EN EL ACTO DE RECEPCIÓN

POR EL

RDO. P. JOSÉ ORIOL CARDÚS ALMEDA, S. J.

Y

CONTESTACIÓN

DEL

EXCMO. SR. D. MANUEL ALÍA MEDINA

EL DÍA 16 DE MARZO DE 1988



MADRID

DOMICILIO DE LA ACADEMIA:

VALVERDE, 22 - TELÉFONO 221 25 29

1988

**DISCURSO
DEL
RDO. P. JOSÉ ORIOL CARDÚS ALMEDA, S. J.**

**Tema:
EL GEOMAGNETISMO: CIENCIA EN PROGRESO**

Excmo. Señor Presidente,
Excmos. Señores Académicos.
Señoras y Señores.

A la sorpresa que me produjo el anuncio del Sr. Secretario de la propuesta y siguiente elección para ocupar un sillón en esta Academia, se unió inmediatamente la preocupación por la elección del tema; por una parte no podía contentarme con decir algunas ideas generales, para salir del paso, como comúnmente se dice, y por otra, conociendo mis limitaciones, me era muy difícil el encontrar un tema, que pudiera interesar medianamente y al mismo pudiera tratarlo con conocimiento de causa.

El hecho de haber trabajado prácticamente toda la vida en el Observatorio del Ebro, centro fundado en 1904 por el R. P. Ricardo Círrera para el estudio de las Relaciones Sol-Tierra y el haberme dedicado en el mismo a la Sección Solar y a la Magnética me ha inducido a pensar que si de algo podía hablar, era del campo magnético terrestre ya que el mismo, en su componente externa, sufre una evidentemente fuerte modulación por la actividad solar; además creo que el tema es suficientemente interesante, al mirarlo desde su componente histórica, para sacar de él algunas consideraciones, que quizás puedan ayudar algo a cumplir el artículo primero de los Estatutos en los que se dice que «La Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tiene por objeto fomentar el estudio y la investigación de las Ciencias Exactas, Físicas, Químicas, Geológicas y Biológicas y de sus aplicaciones, así como propagar su conocimiento».

* * *

Antes de entrar directamente en mi tema, es un grato deber el dedicar un tributo de reconocimiento al Excmo. Sr. D. José M. Ríos García, que dejó este sillón, que ahora vosotros habéis querido asignarme. El Dr. Ingeniero de Minas, D. José M. Ríos, tiene una trayectoria neta en el campo de la Geología: en 1927 ingresa en la Escuela de Ingenieros de Minas y acaba su carrera en 1933 con el premio Gullón. En los años 1934 y 1935 se dedica al estudio de las estruc-

turas cristalinas en el Instituto de Física y Química, bajo la dirección del Prof. Julio Palacios y en la Victoria University de Manchester, bajo la dirección del Prof. Bragg, premio Nobel de Física.

Este mismo año inicia su labor docente en la escuela de Minas como Ingeniero de Prácticas y en 1940 ingresa por concurso en el Instituto Geológico y Minero como Ingeniero Auxiliar. Dos años después es nombrado, también por concurso, Profesor Auxiliar de Geología y Paleontología de la Escuela de Minas y al año siguiente es nombrado Profesor Numerario de la misma e ingresa en el Cuerpo de Ingenieros de Minas.

Su labor científica queda bien reflejada en su amplia bibliografía que comprende más de 150 trabajos, varios de ellos en colaboración, y también diversas traducciones y adaptaciones de obras extranjeras.

Su labor de investigación geológica se extiende principalmente a la zona del norte de España y ha tomado una parte muy activa en la confección del Mapa Geológico de España, no sólo en la planificación de los trabajos previos a su elaboración, sino también en la producción de muchas de sus hojas.

Numerosos han sido sus trabajos sobre la relación de los estudios geológicos con los recursos naturales como hierro, bauxita, lignitos y especialmente petróleo.

Su interés por la formación de la juventud en temas geológicos le llevó a fundar los «Campamentos para Prácticas de Geología», de los cuales, ya en el año 1975, se habían celebrado 20 y a los que dedicó varios de sus escritos.

Su amplia labor se ha visto reconocida con los nombramientos que ha tenido: Consejero Presidente de Sección del Consejo Superior del ministerio de Industria, Académico de Número de la de Doctores de Madrid, Correspondiente de las Reales Academias de Ciencias y Artes de Barcelona y de la de Ciencias de Zaragoza, Consejero de Número del Patronato «Saavedra Fajardo» del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Presidente de la Empresa Minera Nacional del Sahara, Miembro de la Société Géologique, de la American Association of Petroleum Geologists y de la Geological Society of America.

Es para mí un honor el ocupar el sillón que él tan dignamente ocupó y al que voluntariamente renunció al pedir pasar a Académico Super-numerario.

EL GEOMAGNETISMO CIENCIA EN PROGRESO

El Geomagnetismo, como las Ciencias en general, no ha nacido perfecto, como Minerva de la cabeza de Júpiter, sino que se ha ido formando a partir de unos conocimientos experimentales a los que la mente analítica e investigadora ha aplicado teorías ya conocidas o de nueva formulación; la adecuación de estas teorías a las experiencias ha hecho aceptar los fenómenos y al mismo tiempo ha planteado nuevos problemas que han requerido para ser solventados nuevas experiencias, las cuales han confirmado y a veces refutado, las teorías anteriores, obligando, por consiguiente, a rehacer en parte el camino recorrido. No es pues de admirar, que al mirar retrospectivamente la trayectoria seguida por una ciencia cualquiera, encontremos en ella afirmaciones dudosas e incluso falsas, que son luego modificadas o rechazadas, pero que han servido también para que la Ciencia progrese en su camino hacia la formulación más exacta de los fenómenos naturales: incluso, a veces, un resultado negativo de la observación o de la aplicación de una teoría precedente, ha servido para encauzar, más o menos definitivamente, el rumbo que han de seguir los futuros investigadores.

Si en este contexto analizamos a grandes rasgos el desarrollo del Geomagnetismo veremos que en él se ha progresado lentamente, pero siguiendo una línea de desarrollo bastante coherente, pero que quizás presenta la característica que este desarrollo no ha sido homogéneo a lo largo del tiempo sino que en el mismo se han producido, en unos pocos determinados momentos, verdaderos saltos bruscos, que han cambiado casi radicalmente el desarrollo de los conocimientos. Creemos que en Magnetismo se pueden señalar, usando la conocida expresión de Stefan Zweig, tres «Momentos Estelares», que los hemos de situar en 1600 con la aparición del libro de Gilbert «De Magnete»; en 1832 en

que Gauss publicó su trabajo «Intensitas vis magneticae terrestres ad mensuram absolutam revocata» y finalmente en 1957 en el que el lanzamiento del primer satélite artificial abre al Geomagnetismo nuevos e insospechados horizontes. Cada uno de ellos más estelar, si cabe, que el anterior. Estos tres momentos marcan cambios sustanciales en los conocimientos magnéticos como creo se podrá ver en lo sucesivo.

EL IMÁN

La humanidad parece que conoció ya desde los tiempos más remotos la existencia de piedras naturales, que tenían propiedades magnéticas; es decir que se atraían o se repelían mutuamente y que actuaban sobre otros minerales como el hierro al que incluso podían conferirle sus propiedades magnéticas. Homero, Platón, Pitágoras, Aristóteles y otros escritores griegos mencionan las piedras magnéticas; Thales de Mileto (640 a.C.) las llama piedra de Heraclea; Hipócrates las empleaba en medicina; Plinio cuenta la fábula del pastor «Magnes» que al subir al monte Ida notó que los clavos de hierro de sus zapatos eran atraídos por el suelo y al excavar la tierra encontró una roca que atraía el hierro; quizás le dio al pastor el nombre de «Magnes» porque Platón ya había dado a la pirita magnética el nombre de piedra de Magnesia (magnetis lithos). Las propiedades atractivas de los imanes habían sido usados para sustentar en el aire, al menos así lo describen algunos autores antiguos, imágenes pesadas: como por ejemplo el Rabino Moisés, hijo de Maymon, nos dice que en el templo de Bel, en Babilonia, había la imagen del Sol suspendida en el aire por la fuerza magnética, o en escritos talmúdicos en los que se afirma que Joro-boam incitaba a la idolatría por medio de terneros de oro suspendidos en el aire por imanes. No todo debían ser exageraciones y sí parece cierto que el árabe Abu Musa Deschber levantó con imanes pesos de hierro de 100 diras, sin que conozca la equivalencia de la dira en gramos.

LA BRÚJULA

Es natural que conocida la propiedad atractiva y repulsiva de los imanes se hicieran con ellos experimentos y se llegara a ver no sólo que se movían por la proximidad de otros imanes sino que dejados libres se orientaban todos en dirección norte-sur. De aquí, al descubrimiento de la brújula, aparato para medir la dirección del Norte, no hay más que un paso y como dice Kircher en su «De Arte Magnetica», es muy probable que muchos pueblos distintos la descubrieran indepen-

dientemente. Resulta imposible, por lo menos para nosotros, el determinar cuándo y dónde apareció primeramente la brújula.

Como en tantos otros casos de aparatos relacionados con las Ciencias Naturales se ha atribuido a la China al descubrimiento de la brújula; A. Crichton Mitchell cita la siguiente historia tomada de los Anales chinos: En el año 2364 a.C. el Emperador Hoang-Ti entró en guerra con su vasallo Tchi-Yeon y en la gran batalla en las llanuras de Tcho-luo el vasallo para poder escapar, produjo una espesa niebla que le ocultaba; esta niebla produjo gran confusión en el ejército imperial pero Hoang-Ti construyó un carromato en el que puso una figura con el brazo extendido y ésta, que podía girar sobre un pivote vertical, se orientaba de tal forma que el brazo extendido siempre indicaba la dirección sur. Gracias a este artificio, el emperador pudo orientarse y capturar al vasallo rebelde que fue ejecutado. En esta relación no se menciona para nada el magnetismo; fueron los jesuitas, comentaristas de los Anales de la historia China, hacia finales del siglo XVII, los que para explicar por qué el brazo siempre iba dirigido al sur, supusieron que la figura se movía a causa del magnetismo. Crichton Mitchell da varias razones para refutar la historicidad del relato, pero aunque fueran los jesuitas europeos los que en el siglo XVII mencionaran la posible causa magnética de la orientación de la brújula, no deja de llamar la atención el hecho que se mencionase un artefacto que siempre se orientaba hacia el sur; con ello no queremos afirmar ni mucho menos que ya 2000 años a.C. los chinos conocían la brújula. Aunque no sea más que como curiosidad, y que sirva para indicar cómo la imaginación de algunos escritores antiguos ha trabajado, Kircher dice que algunos habían afirmado que Salomón en la expedición naval a Ofir, de la que se habla en la Biblia, había empleado la brújula, y el mismo Kircher continua: «yo mismo he investigado, en cuanto me ha sido posible, este pasaje, tanto en libros impresos como manuscritos de los comentaristas latinos, griegos, hebreos y árabes y no he podido encontrar ninguna referencia a algún artificio de navegar especial».

Sin embargo, esta referencia nos introduce en el tema de la brújula en su relación con la navegación, que fue una de las primeras aplicaciones de la misma. Y aquí viene de nuevo la incertidumbre ¿cuándo aparece por primera vez mencionada la brújula?, y más importante quizás ¿cuándo se usó por primera vez la brújula como instrumento de navegación? También aquí nos encontramos con leyendas, que no nos aclaran la cuestión: por ejemplo se cita el hecho que antiguos navegantes cogidos en alta mar por una fuerte tempestad durante la noche, echaban al mar una tabla en la que habían superpuesto una piedra imán y la dirección en la que se orientaba les ayudaba a encontrar el rumbo perdido.

Es bastante corriente atribuir la invención de la brújula náutica a Juan Goia, Gira, e incluso Flavia Gioja, natural de Amalfi, en el año 1302; el mismo Kircher se inclina por esta hipótesis en su cap. VI del libro I, parte 1.^a de la obra ya citada, aunque en el capítulo I del libro II parte 6.^a reconoce que otros autores la juzgan más antigua. Parece, sin duda alguna, según el ya también citado Crichton, que la primera mención de la brújula y de su aplicación a la navegación es de Alejandro Neckam, monje de San Albano (1157-1217), que escribió dos tratados: *De Utensilibus* y *De Rerum Naturis*; en el primero de ellos describe la brújula, que marca el Norte y afirma que los marinos la usan para conocer el rumbo cuando el cielo está cubierto y no pueden ver el sol o las estrellas. En el segundo libro describe la brújula como una aguja imantada, sostenida por un pivote, lo que puede ser una evolución de la aguja suspendida de un hilo o flotando por medio de madera o corcho en el agua; la fecha de estos libros no se conoce pero parece que hay que situarla a fines del siglo XII; Crichton se inclina por el año 1187. Es interesante mencionar que Neckam no presenta la brújula como un nuevo invento sino como instrumento de uso corriente.

En el siglo XII son ya frecuentes las descripciones que tenemos de la brújula y de algunas de sus aplicaciones; así por ejemplo Guyot de Provins en su poema «*La Biblia*» habla de la aguja imantada flotante, que él llama *Marinette*; la fecha del poema es incierta y la he encontrado reseñada entre 1181 y 1209, pero con preferencia en 1206. En 1218 Jacques de Vitri publicó una descripción de Palestina y habla de la brújula como de un instrumento necesario para la navegación que él había visto en 1204. La menciona también Vicente de Beauvais en su obra «*Miroir de la Nature*», de 1224. Más interesante resulta la carta de Pierre de Maricourt, conocido también por Pedro Advigerio o Pedro el Peregrino, del 12 de agosto de 1269, a su amigo Sigerio de Foucancourt, en la que describe sus experiencias con los imanes; de especial importancia es su explicación de cómo construyó con material magnético una esfera en la que pudo estudiar la dirección de la fuerza magnética gracias a otros imanes móviles colocados en su superficie; dibujó en la superficie líneas según la dirección de la fuerza y vio que concurrían en dos puntos diametralmente opuestos, que llamó «polos»; también pudo distinguir uno de otro polo porque haciendo flotar la esfera con un soporte de madera, un polo se dirigía al Norte y otro al Sur; encontró también que los polos distintos se atraían y que los iguales se repelían. Sus hallazgos y su método de experimentación fueron alabados en su libro «*Opus Tertium*» por el franciscano Rogelio Bacon (1214-1294), que durante varias décadas profesó ciencias experimentales en las Universidades de París y de Oxford. Nuestro gran filósofo mallorquín Raimundo Lull (1232-1315) habla de la brújula en

su libro «Fénix de las Maravillas del Orbe», escrito en 1286, y también hay referencias en las Siete Partidas del rey Alfonso el Sabio (1221-1284). Finalmente indicamos que el historiador Zurita habla de la utilización de la brújula por los pilotos de la escuadra de Roger de Llúria (1250-1300) en su clásica obra «Anales de la Corona de Aragón».

LA DECLINACIÓN

Hemos pasado, pues, del conocimiento de las propiedades magnéticas de algunos minerales a la construcción de aparatos que indicasen el Norte, pero aún no hemos llegado a poder hablar de la Declinación Magnética o ángulo que forma el meridiano geográfico con el que indica la brújula.

Era normal que conocida la propiedad del imán de dirigirse al Norte fuera aprovechada por los científicos de aquel tiempo, que necesitaban en sus trabajos conocer la verdadera dirección del meridiano; en dos líneas de estudio era particularmente necesario este conocimiento: los cartógrafos y los confeccionadores de relojes solares, en los que la orientación del aparato era esencial para que señalasen la hora exacta. Es muy posible, pues, que la comprobación que la brújula no se dirigía al Norte verdadero, fuera observándose paulatinamente y la idea fuera madurando progresivamente. De finales del siglo xv hay relojes de Sol en los que parece se ha tenido en cuenta la declinación: varios de ellos van provistos de brújula y en la graduación del limbo de ésta hay una señal algo al Oeste del punto Norte; si la Declinación era en Europa en aquella época de unos grados al Este, al orientar la brújula de modo que marque el Norte, el punto en el dial indicaría la posición del Norte geográfico. Ejemplo de estos relojes solares es el fabricado en 1451 y conservado en el Museo Ferdinandeum de Innsbruck; hay otros relojes encontrados por Wolkenhauer, construidos en 1453, 1456, 1470 y 1511, todos los cuales indican una declinación Este y se cree que provienen de Nuremberg; otro reloj encontrado por Le Monnier en París y construido por Bellerminus tiene fecha ya posterior de 1541 y muestra una declinación Este de unos 7°, que se refiere probablemente a París.

También algunos mapas de este tiempo tienen indicaciones de la declinación; entre los primeros conocidos está el mapa de Nuremberg, de fecha probable el 1492, que lleva impresa la imagen de una brújula y en el que se explica cómo hay que usar el mapa en unión con la brújula para determinar la verdadera dirección; la declinación que muestran es algo superior a los 11°. El mapa, trazado por Andrea Bianco en 1436, permitió al Profesor Bauer deducir que en aquel tiempo la Declinación en Roma era de 5° E.

1492 es la fecha del descubrimiento de América; Colón en su cuaderno de bitácora escribe en la entrada correspondiente al día 13 de septiembre, cinco días después de salir de Canarias: «al anochecer las agujas nordesteaban mientras que de madrugada norusteaban algún tanto». Parece que de estas palabras se deduce que Colón en este día había pasado de una declinación oriental (nordestear) a una occidental (noruesrtear), para lo cual tuvo que pasar por la línea agónica o de declinación nula; que el fenómeno era real y no debido a error de orientación parece confirmarse por lo que a continuación dice «Tomaron los pilotos el Norte marcándolo y hallaron que las agujas noruesteaban una buena cuarta y tenían los marineros y estaban apenados y no decían de qué. Conociólo el Almirante, mandando que tornasen a marcar el Norte en amaneciendo y hallaron que estaban buenas las agujas». No creo que de este texto pueda inferirse que Colón fuera el descubridor de la Declinación, pero sí que parece que fue el primero que dejó constancia escrita del paso por la línea de Declinación cero, aunque algunos autores han procurado negarle incluso este descubrimiento.

Es claro, pues, que la brújula era empleada comúnmente por los marinos y que se había ido desarrollando la idea que la dirección de la aguja magnética formaba un ángulo con la dirección del meridiano geográfico sin que parezca ser posible el determinar quién lo descubrió por primera vez. Por su relación con nuestra historia, permítaseme citar el nombre del farmacéutico sevillano Felipe Guillén quien, en 1525, pesentó al rey Juan III de Portugal su Brújula de Variación, que parece ser el primer instrumento que resolvió el problema de determinar la longitud en el mar por medio del magnetismo; dicho aparato fue perfeccionado por Pedro Nunes y después de ser probado en Evora en 1533, fue entregado por el Infante Don Luis, que había estudiado matemáticas y astronomía con Pedro Nunes, a Juan de Castro, capitán de una de las once naves que zarparon para las Indias Orientales en 1538, para que probara el instrumento y comprobara el método para determinar la longitud. Gracias a ello hoy poseemos una serie de 43 observaciones de Declinación, entre los años 1538 y 1541, hechas durante el viaje y en su prolongación por las costas oeste de la India y hasta el Mar Rojo, que es la primera serie de tales medidas que ha llegado hasta nosotros.

LA INCLINACIÓN

Antes de pasar adelante para ver cómo evolucionó el conocimiento de la Declinación magnética, hemos de detenernos un poco porque la brújula nos da en su orientación otro ángulo: el buceo o inclinación. Nótemos ya desde ahora, que en autores primitivos se llama Declinación lo que nosotros llamamos Inclinación (ángulo en el plano ver-

tical) y Variación, lo que nosotros llamamos Declinación (ángulo en el plano horizontal). El primer dato escrito sobre la Inclinación parece que se encuentra en la carta que el 4 de marzo de 1544 escribió el vicario de St. Sebald en Nuremberg al duque Albrecht de Prusia, en que describe sus observaciones de la Declinación y añade que si una aguja no imantada se equilibra horizontalmente, al imantarla se inclina. Parece pues, que había descubierto el ángulo de Inclinación; por desgracia el valor que da al ángulo observado es de 9° , cuando debía ser de unos 70° lo que hace que se ponga en duda su descubrimiento. Más confianza merece la atribución del descubrimiento a Roberto Norman, hidrógrafo y constructor de brújulas, el cual usando imanes con eje de suspensión horizontal determinó la Inclinación en Londres en 1576; publicó sus datos en 1581 con el título «The Newe Attractiue» (La nueva atracción) y daba notas sobre el uso de la brújula de Inclinación.

En 1600 Gilbert, al que nos referiremos próximamente, acepta ya plenamente la existencia de la Inclinación y fija la posición de la aguja magnética según su situación respecto a la Tierra: perpendicular a la superficie de la Tierra en los polos y paralela en el ecuador.

En la obra de Kircher se afirma en el Teorema XII del libro I, parte II, que el imán se eleva o se deprime según la latitud del lugar y da los siguientes valores recogidos de diversos autores: suyo, en Roma (lat. $41^\circ 56'$) inclinación $65^\circ 50'$; Gilbert, a los 50° de latitud, $71^\circ 40'$; Cabanes a los 45° , 62° ; Grandamicus en Francia (Tours?) a los $43^\circ 43'$ de latitud encuentra 70° y el mismo Kircher en Malta a los 35° , halla $59^\circ 15'$, que dice concordar con otras observaciones hechas en el Sur de Italia. Además de explicar cómo la brújula se orienta a lo largo de los meridianos y de deducir su orientación por los ángulos que forman las líneas que van de ambos polos al punto en que se ha colocado el imán, calcula por senos y logaritmos la tabla de inclinaciones que corresponden de grado en grado a la latitud de la Tierra y la compara con los datos dados por Gilbert. Su tabla vale, dice, para el hemisferio boreal, porque para el austral no se tienen observaciones.

Dos puntos más queremos señalar en la obra de Kircher sobre la Inclinación: para él la dirección de fuerza magnética se ejerce desde todos los puntos del cuerpo magnético hacia los polos y después se difunde esféricamente desde los polos. Este «lema» es el que le permite corregir algo las inclinaciones dadas por Gilbert para las diversas latitudes. El segundo punto es su otro «lema» según el cual si desplazamos a lo largo de un meridiano una brújula de inclinación, el instrumento al llegar de nuevo al punto de origen habrá dado una vuelta pero la aguja imantada habrá dado dos vueltas. Este resultado es, evidentemente, el efecto de la distribución del campo magnético terrestre.

Si es incierta la aparición de la brújula y el conocimiento de la Declinación magnética, hay una fecha clara, a la que nos hemos referido al principio como a uno de los momentos estelares para la ciencia del magnetismo: 1600. Guillermo Gilbert, médico de la reina Isabel de Inglaterra, publica su libro «De Magnete» y parece que con él el magnetismo entra en su primer período de esplendor. El gran mérito de Gilbert consiste en basarse más en los datos experimentales que en las teorías y elucubraciones filosóficas, a las que, por desgracia se habían ido inclinando los científicos; Gilbert aprovechó los datos que otros habían observado, se sirvió también de una terrella, hecha de material magnético y en ella estudió las propiedades de una esfera imantada. Resultado de sus estudios fue la publicación del libro «De Magnete», que puede considerarse como el primer tratado científico de esta ciencia. En él hay un punto verdaderamente esencial y que por él sólo ha hecho que este libro sea un hito en la historia del magnetismo; después de comparar las observaciones hechas con su terrella magnética con los datos de experimentos realizados con la brújula llega a la conclusión siguiente, expresada en forma lapidaria en el título del capítulo I del libro VI: «Acerca del Globo Terrestre, el Gran Imán». Con esta idea que asimila la Tierra a un imán nació el Magnetismo Terrestre, o Geomagnetismo, como preferimos llamarlo ahora.

Es evidente que Gilbert, hombre de su tiempo, estuvo sujeto al ambiente reinante y, por tanto, en su libro aparecen todavía creencias que escapan a la observación científica, como por ejemplo la astrología y la influencia de los astros en los destinos humanos.

Tampoco acertó en explicar las verdaderas causas del magnetismo terrestre, lo cual era imposible en su tiempo y también se equivocó en su afirmación que la declinación era constante en cada punto de la Tierra: «Variatio uniuscuiusque loci constans est»; este punto se basaba en la explicación que daba de la fuerza magnética de la Tierra por lo cual afirmaba su constancia «a no ser que ocurriera una gran catástrofe como la destrucción de un continente o un hundimiento como el que ocurrió en la Atlántida, del que nos hablan Platón y los antiguos, que alterase la configuración de la Tierra».

Asimilada la Tierra a un gran imán con sus polos, observa la inclinación de la brújula y deduce su dirección en las diversas partes del Globo.

Su obra tuvo gran resonancia en su tiempo y mereció muchos encomios pero fue también tachada de herética porque apoyaba las ideas de Copérnico. Entre los que aprobaron su obra se encuentra Kepler, Galileo y, aunque disintiendo en varios puntos, el jesuita Kircher, que comenta en muchos pasajes la obra de Gilbert. No puedo dejar de citar

aquí las palabras de Galileo en uno de sus Diálogos Científicos: «Creo que (Gilbert) es digno de un aplauso extraordinario por las muchas, nuevas y verdaderas observaciones que hizo para confusión de muchos autores fabulosos que escriben no sólo lo que ellos conocen sino también cualquier cosa que han oído del vulgo ignorante, sin buscar la confirmación de lo oído por sus propias experiencias, quizás porque no desean reducir el volumen de sus libros». La mordaz pluma de Galileo, da, una vez más, un sabio consejo a los escritores científicos. Pocos años después de la aparición del libro de Glibert, cuya importancia hemos indicado, se imprimió un nuevo libro «Magnes, sive de Arte Magnetica, opus tripartitum», que ya antes hemos mencionado, y que debió tener buena difusión en Europa, ya que de él se hicieron tres ediciones en vida de su autor (Roma, 1641; Colonia, 1641, y de nuevo en Roma, 1656). En estos tres tratados se quiere describir todo lo referente al magnetismo y hay, evidentemente, muchas páginas en las que el autor se extiende en consideraciones «filosóficas» sobre las fuerzas atractivas y repulsivas de la naturaleza (cielo, minerales, plantas, animales y personas) atribuyéndolas a una especie de «magnetismo»; pero si dejamos a un lado estas elucubraciones, encontramos en el libro una discusión muy seria sobre los conocimientos que en aquel tiempo se tenían del magnetismo terrestre y un tratamiento de los mismos en los que la experimentación es la base de las teorías.

Su autor es el Padre jesuita Atanasio Kircher, nacido en Fulda en 1601 y que en 1618 ingresó en la Compañía de Jesús; fue profesor de matemáticas, filosofía y lenguas orientales en el colegio de los jesuitas en Wutzburgo hasta que la guerra de los 30 años le desplazó a Aviñón, de donde pasó a Roma, en donde desempeñó la cátedra de matemáticas y lengua hebrea en el Colegio Romano hasta su muerte en 1680. Escribió numerosas obras sobre arqueología, lenguas orientales y la que a nosotros nos interesa sobre Magnetismo. Como él mismo nos cuenta, una de sus preocupaciones era la Geografía y los errores que se cometían en la fijación de las posiciones geográficas; en los archivos del Colegio Romano encontró datos geográficos y magnéticos enviados desde diversas partes del mundo por otros jesuitas y pensó en la utilidad que estos datos podían tener para la ciencia de su tiempo. Los datos le permiten afirmar que «la realidad de la Variación es cierta y está fuera de toda falsedad o duda; la única falsedad que existe está en la cantidad (en el valor) de la Declinación». Más adelante afirma: «los autores asignan a diferentes causas esta Variación, de tal manera que casi nadie concuerde con algún otro, y me pareció que no podía haber otro medio para resolver estas perplejidades que la observación». Aprovechando, pues, los viajes que los misioneros jesuitas hacían a las Indias Occidentales y Orientales y los Colegios que los jesuitas tenían en Europa, después de consultarlo con sus compañeros

de Roma y recabada la aprobación de los Superiores, escribió cartas para que se hicieran observaciones de la Variación Magnética y de la Inclinación por todo el Océano, «para unir las a las que ya tenía en Roma y poder así ofrecer a la posteridad alguna luz en las disquisiciones sobre la filosofía del magnetismo». Creo que es esta una de las primeras campañas, más o menos sistemáticas, de observación a escala internacional de un fenómeno magnético. Kircher mismo aprovechó un viaje por el Mediterráneo para hacer observaciones magnéticas; el resultado de su esfuerzo coordinador y del trabajo de sus compañeros son tres tablas en las que nos da en la Primera la «Declinación Magnética General en los Océanos sacada de las observaciones marinas hechas por los jesuitas portugueses, ingleses, bávaros y otros». Contiene una lista de unos 198 puntos con su latitud y Declinación. Por el norte la máxima latitud señalada es de $81^{\circ} 0'$ junto a Nova Terra Hollandorum, conocida por «Nielandt», su declinación era de $16^{\circ} 0'$ Este; en el Sur la máxima latitud que encontramos es de $62^{\circ} 50'$ en el estrecho Davis en Batavia y su Declinación de $50^{\circ} 0'$ Oeste. Entre las capitales europeas encontramos: Amberes (lat. $51^{\circ} 0'$; Dec. $9^{\circ} 0'$), Amsterdam ($52^{\circ} 29'$ y $9^{\circ} 30'$), Londres ($51^{\circ} 32'$ y $11^{\circ} 30'$) y hay datos de otras varias ciudades.

La Tabla II contiene la «Longitud y la latitud de varios lugares con su declinación magnética, la mayor parte de las cuales fueron observadas por Juan Teliero en su navegación a las Indias Orientales». No se indican nombre geográficos; los puntos están identificados por su longitud y latitud y ordenados por longitudes crecientes; a cada uno de ellos se le señala la Declinación correspondiente. En las longitudes hay una aparente anomalía en cuanto después de dar la longitud de $41^{\circ} 10'$, sigue con la $347^{\circ} 25'$ hasta llegar a los $359^{\circ} 40'$, para seguir después con la longitud de $42^{\circ} 07'$; la razón de esta anomalía, es para reunir primero las declinaciones Este y luego las Oeste; como se puede ver, el valor de $347^{\circ} 25'$ empalma perfectamente con el final de la tabla, cuya última entrada es $346^{\circ} 0'$; con ellos la tabla terminaría con $359^{\circ} 40'$ con los que se había cerrado la circunvalación de la Tierra. Las latitudes están marcadas con a o b según sean australes o boreales. Las Declinaciones son al Este desde los 0° hasta los 41° de longitud y de los $347^{\circ} 25'$ hasta los 0° mientras que son al Oeste de los $42^{\circ} 0'$ a los 346° . Las Declinaciones extremas observadas son $15^{\circ} 20'$ Este (long. $5^{\circ} 28'$, lat. $25^{\circ} 11' N$) y $27^{\circ} 0'$ (long. $344^{\circ} 30'$, lat. $77^{\circ} 12'$). Por desgracia no se indica el meridiano origen de las longitudes.

La Tabla III contiene las «Declinaciones magnéticas observadas en Europa por matemáticos a instancias del autor». Contiene 57 nombres de autores y da la Declinación en unas 66 ciudades de Europa que van desde Lisboa a Constantinopla y de Siracusa a Vilna en Lituania; añade además otros seis valores uno para Alepo en Siria y Ale-

jandria en Egipto, dos en la India (Goa y Narfinga) y dos en China (Canton y Macao). Da únicamente la latitud de los lugares y al no dar las fechas de las observaciones, es difícil el compaginar los valores. Además de estas tres tablas aún se encuentran en el texto otras referencias como las de la carta del P. Francisco Bresciano en su viaje al Canadá en donde, entre otros datos, afirma que en Kebeck (así lo escribe) midió 16° y que en territorio de los Hurones, que dista de Quebec unas 200 leguas encontró una Declinación de sólo 13° . Otra larga carta, añadida en la 3.^a edición del libro, contiene entre otras cosas los valores de la Declinación medidos por el P. Martín en su viaje a Goa; en este caso conocemos la fecha de la carta, 8 de noviembre de 1640, pero nos encontramos con la inseguridad de las referencias geográficas, como por ejemplo «a la vista de las islas de la Ascensión y Trinidad» o «en la parte septentrional del meridiano Tristán de Cunha», etc.

Sería probablemente un trabajo interesante el intentar dibujar en un mapa, los valores dados por Kircher y compararlos, por ejemplo, con las cartas de Declinación de Halley para el Atlántico en 1701. Pero, fuera cual fuere el resultado de esta comparación, siempre quedaría el recuerdo de aquella empresa conjunta en la que bajo el impulso de Kircher, se aprovecharon viajes, hechos evidentemente con finalidad misionera, para observar un fenómeno natural y así mejorar los conocimientos sobre nuestro planeta; quizás lo mejor sea transcribir unas breves líneas de Kircher: «De todo lo cual concluyo que en todo el hemisferio boreal existe una distribución de la inclinación magnética según la latitud (...) si esta distribución existe también pasado el ecuador, se ignora ya que no sé de nadie que lo haya probado. Por tanto, como que varios matemáticos nuestros, jesuitas, este año iban de Roma a Etiopía, China y Jajón, les instruí sobre la Variación magnética (Declinación) y la Inclinación y les enseñé el método para observarla; al mismo tiempo les rogué encarecidamente, que experiencias de tanta importancia las hicieran en tierra y mar con la mayor diligencia posible para no privar la República Filosófica de tal bien» y concluye «l ocaul ellos prometieron cumplir» y nosotros nos permitimos añadir, a la vista de los datos que figuran en el libro, que cumplieron lo prometido.

VARIACIÓN SECULAR

Aún estaba fresca la tinta del libro de Gilbert, por decirlo así, cuando su afirmación de que la Declinación era fija para cada lugar, fue puesta en duda; en efecto, en 1622 Eduardo Gunter profesor de Astronomía en el Gresham College de Londres halla que la Declina-

ción en Londres era de $5^{\circ} 56' 30''$ el día 13 de junio de 1622, cuando el 16 de octubre de 1580 Guillermo Borough había encontrado para el mismo lugar una Declinación de $11^{\circ} 16'$, lo cual representaba una disminución de algo más de 5° en unos 42 años. Parece que Gunter no se atrevió a publicar su descubrimiento, ya sea por temor a inexactitudes en los datos de Borough o por respeto a las ideas de Gilbert. La conclusión la saca el sucesor de Gunter en la cátedra, Enrique Gellibrand, que en 1635 publica un «Discurso matemático sobre la Variación (Declinación) del imán junto con su admirable disminución recientemente descubierta». Para ello se basaba en la observación de la Declinación hecha en el mismo sitio que las anteriores, el 12 de junio de 1634 y en la que encontró un valor de $4^{\circ} 3' 30''$. Notemos de paso que estos datos corresponden a una disminución anual de la Declinación magnética, lo que hoy llamamos «Variación Secular» de un valor de unos $8'$ por año. Los datos de la Declinación y las fechas de las observaciones los hemos tomado del libro de Kircher en el capítulo titulado «De la Variación de la Variación magnética», en el que dice que le fueron enviados desde París, lo que nos indica la comunicación que ya en aquel tiempo tenían los científicos de diversos países.

Estos descubrimientos sirven preferentemente para la navegación, pero ha de pasar algo más de medio siglo hasta que Halley publicase, en 1701, la primera carta del Atlántico con las líneas de igual declinación (o isógonas) y la ampliase el año siguiente con los datos que había recibido de navegantes en los mares de la India y de China; para la confección de la primera carta usó extensivamente de los datos recogidos en su expedición en el barco Paramour Pinke en el que entre 1697 y 1701 llevó a cabo observaciones de Declinación tanto en el Atlántico Norte como en el Sur; que estos mapas estaban directamente orientados a ayudar la navegación queda claro al ver que las isógonas están trazadas solamente en el mr y no se extienden a los continentes.

Halley imaginaba la Tierra con cuatro polos: dos en la corteza y otros dos en el núcleo; los polos del núcleo suponía que giraban más despacio que los de la corteza y esta velocidad diferencial sería aproximadamente de medio grado por año y creía que esta diferencia podía explicar la Variación Secular de la Declinación. Aunque la idea de los cuatro polos fue ya rechazada por Euler, fue de nuevo investigada y ligeramente modificada por Christofer Hansteen, Profesor de Matemáticas Aplicadas en la Universidad de Noruega en 1816 y en cierto modo fue revivida por Eduardo Walher al afirmar que la Fuerza magnética total de la Tierra mostraba cuatro polos.

Si bien es verdad que la hipótesis de los cuatro polos no ha prosperado, sin embargo, la idea que la rotación diferencial de las diversas capas de la Tierra puedan engendrar corrientes eléctricas que produzcan en la superficie los campos magnéticos que observamos, ha estado

en la base de las modernas ideas que tratan de explicar el magnetismo interno de la Tierra y su Variación Secular. Las ideas de la dinamo, o de las dinamos, autoinducidas están en esta línea de investigación y hoy en día, aunque el problema no está evidentemente resuelto, sirven para inferir algunas de las propiedades de los planetas a base de los datos magnéticos recogidos por las sondas espaciales en sus vuelos por las cercanías de los mismos o al posarse sobre ellos.

Ya hemos hablado de la primera carta de Declinación de Halley, mencionemos, siquiera sea de paso, que la primera carta de inclinaciones es la Joahan Carl Wilke de Estocolmo, de 1768; a las líneas de igual Inclinación las llamó «paralelos de inclinación» e hizo notar que por desgracia podía haber errores de 1° debidos, tanto a la imperfección de los instrumentos, como a la imprecisión de las coordenadas geográficas.

VARIACIÓN DIURNA Y ESTACIONAL

Hasta ahora, como hemos visto, se conocía que la Tierra se comportaba como un imán, que por su polaridad definía dos ángulos en la orientación de la brújula en los distintos puntos del globo y que, por lo menos, el ángulo de Declinación, estaba sujeto a la Variación Secular. Fue en el siglo XVII cuando se descubrió que la Declinación además de la lenta Variación Secular, unos pocos minutos de arco por año, tenía otra variación diurna. Es interesante este descubrimiento porque se lleva a cabo con la colaboración de dos científicos pertenecientes a distintas naciones, Inglaterra y Suecia: en 1722 Jorge Graham, que observaba cuidadosamente los movimientos de la brújula por medio de un microscopio, se da cuenta que todas las brújulas que usa no solamente varían algo en dirección de un día para otro sino que también presentan variaciones en diferentes tiempos del mismo día, esta variación era unos días pequeña y lenta y en otro más fuerte y rápida, por lo cual pudo distinguir entre días de calma y perturbados. En correspondencia con Celsius, que hacia 1741 hacía observaciones semejantes, llegaron a la conclusión que en ambas ciudades, Londres y Uppsala, coincidían los días de calma o perturbados: era pues claro que el «tiempo» magnético era mucho menos local que el «tiempo» meteorológico. Hiorter, sucesor de Celsius, después de hacer más de 20.000 observaciones visuales con la brújula llega a las dos conclusiones siguientes, formuladas en 1747: 1) la brújula oscila diariamente $5'$; unos días más, otros menos, entre su posición extrema al Este, alrededor de las 8 de la mañana y al Oeste hacia las 2 de la tarde. Con esta conclusión quedaba establecida la variación diurna. Aunque sea adelantado algo indiquemos que en 1759 J. Canton publica en las Phi-

losophical Transactions de la Royal Society de Londres su observación que la variación diurna en días de calma es claramente menor en invierno que en verano; según él la amplitud promedio de la variación diurna en Londres, en días de calma, es en invierno algo menor de 7' y algo mayor de 13' en verano. Estas observaciones de Canton parece pueden considerarse como el descubrimiento de la variación magnética estacional a lo largo del año.

PERTURBACIONES MAGNÉTICAS Y AURORAS

Hemos afirmado que Hiorter había sacado dos conclusiones de sus observaciones y hasta ahora solamente hemos mencionado la referente a la variación diurna. La segunda conclusión es que las auroras tienen conexión con los movimientos de la brújula, fenómeno que observó por primera vez el 1 de marzo de 1741. Al comunicar Hiorter a Celsius este descubrimiento, le fue contestado que ya lo había observado pero que no se lo había dicho para ver si llegaba a la misma conclusión. Trabajando en este tema Celsius, en abril del mismo 1741, escribió desde Uppsala a Graham en Londres pidiéndole que observara cuidadosamente el magnetismo; la suerte les favoreció porque el día 5 de abril a las 5 de la tarde se observó que la brújula se desviaba $1^{\circ} 40'$ al W de la dirección que tenía a las 10 de la mañana y por la noche se observó en Uppsala una débil aurora; en este mismo día, Graham en Londres, sin ver la aurora, observó, según sus palabras «alteraciones de la Declinación mayores de las que haya nunca visto».

De todo esto Hiorter saca las consecuencias siguientes: 1) las auroras han de ser el fenómeno meteorológico que sucede a más altura ya que pueden afectar simultáneamente Uppsala y Londres; 2) por la brújula se puede predecir si por la noche habrá aurora y viceversa; 3) las auroras pueden ser la causa de las desviaciones mensuales de la brújula, ya que después de algunas auroras la brújula tarda un cierto tiempo para volver a su posición original.

Observaciones en Estocolmo, hechas en 1749 confirmaron la segunda afirmación de Hiorter ya que el 28 de febrero de este año predijo por la tarde que por la noche habría una aurora, ya que la brújula en pocos minutos se había desviado medio grado de su posición anterior: la predicción se cumplió y aquella noche pudieron observar una aurora a la que acompañaron fuertes desviaciones de la Declinación entre $6^{\circ} 50'$ y $9^{\circ} 1'$. Una lista de días perturbados magnéticamente entre 1772 y 1774, dada por Wilke, coincidió, en la mayoría de los casos, con aquellos en que se habían visto auroras en Estocolmo y también en San Petersburgo.

Además de la relación temporal entre las auroras y las perturbaciones magnéticas, Wilke, en 1770, había reconocido que los rayos de las auroras observadas en Estocolmo coincidían con la Inclinación magnética. Con las auroras se introduce en el Magnetismo Terrestre un fenómeno nuevo y a través de él se inicia un fecundo trabajo sobre las causas de las perturbaciones magnéticas de origen externo a la Tierra, que han cobrado una enorme importancia a partir del lanzamiento de los satélites artificiales, como tendremos ocasión de explicar más adelante.

El fenómeno de las auroras polares es conocido desde la más remota antigüedad y por su carácter extraordinario y su magnífico aspecto ha sido frecuentemente asociado a predicciones de catástrofes. Parece que hay indicaciones de auroras en Aristóteles, Plinio y Séneca, aunque estos autores, pertenecientes a la región mediterránea, tenían pocas ocasiones de observar este fenómeno, característico de las latitudes circumpolares. De nuevo parece ser la China, de donde tenemos las referencias más antiguas de observaciones de auroras, parece que hay indicaciones de auroras antes del año 2000 a.C.; pero su descripción simbólica a base de dragones y de otras imágenes, hace, a veces, difícil su identificación. Parece que el nombre de «aurora boreal» se deba al francés Gassendi que escribió sobre la aurora vista en 1621; también Halley publicó en las Transactions de la Royal Society observaciones de las dos brillantes auroras vistas por él y por otros muchos en los años 1716 y 1719. Uno de los primeros libros dedicado a las auroras, si no el primero de ellos, apareció en 1731 publicado por la Academia de Ciencias de París y debido a Jean Jacques Dortous de Mairan. El primer catálogo de auroras es el Frobés, del año 1739, al que se han añadido muy posteriormente los de Fritz (1873), Lick (1962 y 1964) y otros más recientes. Los catálogos de auroras en Oriente, sacados de las crónicas chinas, coreanas y japonesas son más recientes: una de las primeras identificaciones de auroras en oriente se encuentra en la «Historia de la Astronomía china, desde el comienzo de la monarquía china hasta el año 206 a J.C.» escrita por el jesuita francés Antonio Gaubil (1689-1759), que habiendo ido a China en 1723 escribió varios tratados sobre el desarrollo de la Ciencia en China; Mairán había pedido a Gaubil que procurara identificar observaciones de Auroras en las crónicas chinas. Después de Gaubil, Eduardo Biot (1803-1850) identificó otros 40 casos pero sólo publicó dos. Más reciente es el catálogo de M. Keimatsu publicado entre 1970 y 1976.

Las teorías que se dieron para explicar las auroras han variado también con los años y están, naturalmente, influenciadas por el desarrollo simultáneo de otros conocimientos. Entre las más antiguas hipótesis figura la que quiere explicar las auroras como producidas por emanaciones procedentes de la Tierra; parece que a esto se incli-

naba Halley y también Wolf (1716) aplicando este último a las auroras teorías recientemente descubiertas. Para Descartes, las auroras no eran más que una reflexión de la luz solar en el hielo y nieve de los Polos. Para Mairán (1731) el origen de las auroras había que buscarlo fuera de la Tierra y las suponía debidas a la entrada de gas solar en la atmósfera de la Tierra. Los descubrimientos de la radioactividad y de las emisiones de rayos X, y hizo que las teorías sobre las auroras se orientasen en esta dirección y diesen lugar a los trabajos de los que nos ocuparemos más adelante.

LA FUERZA MAGNÉTICA

Hasta este momento, finales del siglo xvii, se conocía la orientación de la brújula, pero no se había podido medir la fuerza que causaba esta orientación: un gran paso en este sentido lo dio el gran científico y explorador Alejandro von Humbolt cuando pudo medir la variación relativa de la fuerza magnética. En su expedición americana entre 1799 y 1803, hizo oscilar en el plano del meridiano magnético su brújula de inclinación y el número de oscilaciones que la brújula hacía en diez minutos le daba una indicación de la fuerza magnética que hacía mover la aguja, referida a la fuerza, desconocida, en otro punto de referencia cuyo número de oscilaciones en 10 minutos se tomaba como unidad. En el fondo lo que hacía era aplicar a las oscilaciones, producidas en el campo magnético, las leyes del péndulo, en el cual los periodos de oscilación son inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de la fuerza de gravedad. Humbolt, junto con Gay-Lussac en su expedición a Italia aplicó el mismo método pero usando la brújula de Declinación con lo que obtenía valores relativos de la componente horizontal del campo magnético. Fruto de su expedición americana, en la que tomó como estación de referencia la población peruana de Micuipampa, en el ecuador magnético, fue el poder afirmar que la fuerza magnética total decrece de los polos al ecuador.

GAUSS

Con esto llegamos en nuestro recuerdo de los avances del magnetismo al segundo de los «momentos estelares»: Carlos Federico Gauss (1777-1855), hijo de jornaleros, fue un insigne matemático, astrónomo y físico; de él se ha dicho que apenas tocó tema en el que no renovase sus mismos fundamentos: además de teórico notable, tenía habilidad en la observación práctica. No es éste el lugar para reseñar toda labor científica de Gauss, nos hemos de ceñir a su aportación en el campo

del magnetismo terrestre y creo que podemos resumirla en tres puntos fundamentales: su método para la medición de la fuerza magnética, su aplicación del análisis armónico esférico al magnetismo, y su creación del Magnetische Verein. Como ya hemos dicho, lo más que se había llegado en la observación de la intensidad del campo magnético, era conocer valores relativos de la misma. Gauss se replanteó el problema y usando la idea de Coulomb que había demostrado experimentalmente que la acción de la Tierra sobre un imán se reduce a un par, pudo asimilar las oscilaciones del imán a un movimiento pendular cuyo período era directamente proporcional a la inercia del imán e inversamente proporcional al producto del momento magnético del imán por la intensidad horizontal del campo magnético. Modificando además el método de Poisson, encontró que la desviación angular de una aguja magnética por un imán era proporcional al cociente del momento magnético del imán desviador por la intensidad horizontal e inversamente proporcional al cubo de la distancia que separaba ambos imanes; este resultado podía obtenerse tanto poniendo el imán desviador perpendicular a la dirección del imán desviado y dirigido a su punto central (posición primera de Gauss), como poniéndolo también perpendicular al imán pero de tal modo que la dirección de éste pase por el centro del imán desviador (segunda posición de Gauss); conocidos, pues el producto del momento magnético por la intensidad del campo y su cociente era posible encontrar cualquiera de estos dos valores. Naturalmente que en esta brevísima indicación hemos prescindido de los procedimientos que empleó para determinar el momento de inercia de su imán y la distancia entre los dos imanes, lo mismo que las correcciones y refinamientos introducidos para corregir los efectos causados por la torsión del hilo de suspensión, inducción mutua de los imanes, etc. Su método es aún usado actualmente en muchos Observatorios.

Estos resultados los publicó en 1832 en su Memoria titulada «*Intensitas vis magneticae ad mensuram absolutam revocata*». Es fácil ver la enorme importancia de este avance, pues, al conocer ahora la intensidad de la fuerza magnética horizontal y los dos ángulos de Declinación e Inclinación, el vector magnético queda perfectamente definido en cada punto y momento de observación.

Su segunda aportación fue aplicar al magnetismo terrestre la teoría del Potencial de Newton y desarrollarla para el campo magnético de la Tierra por medio del análisis armónico esférico: si se conocen las componentes del campo magnético terrestre en un número suficiente de estaciones, definidas por su longitud y latitud geográfica y, naturalmente, situadas todas en la superficie de la Tierra, de radio supuestamente uniforme, es posible desarrollar la fórmula del potencial y determinar para cada punto los valores que este potencial da para las tres componentes del campo magnético. Procediendo a la inversa, de

las componentes magnéticas de diversos puntos, conocidos por la observación, es posible calcular la función potencial que se ajusta mejor a las componentes observadas; además, la teoría demuestra que si conocemos el valor de la componente vertical y de otra componente en la superficie de la Tierra es posible separar la parte del potencial debida al interior de la esfera y la parte debida a la materia exterior. Gauss usó los datos deducidos de las cartas magnéticas de Sabine para la fuerza total, la de Barlow para la Declinación y la de Horner para la Inclinación. De ellas calculó los valores de las componentes magnéticas en 84 puntos del Globo repartidos en grupos de 12 puntos igualmente espaciados de 30 en 30 grados de longitud y situados en círculos de latitud. Una vez verificado el análisis llegó a las conclusiones siguientes, que definen cuantitativamente el campo magnético terrestre: 1) El campo magnético terrestre proviene casi todo de un potencial; 2) Este potencial es casi todo de origen interno; 3) El término más significativo del desarrollo es el del grado uno. El valor de este término de grado uno representa el potencial creado por un dipolo magnético alineado según un eje ligeramente excéntrico respecto al eje de rotación de la Tierra y situado en el centro de la misma. Los polos magnéticos definidos por este dipolo, tomando los datos adoptados por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía para 1965.0, después de los trabajos del Mapa Magnético Mundial, están situados a

78.6° N, 69.8° W y 78.6° S, 110.2° E

con un Momento Magnético del dipolo de 8.01×10^{15} weber \times m o de 8,01 teslas \times m.

Gauss expuso su trabajo en 1838 en su «Allgemeine Theorie der Erdmagnetismus» que ha sido realmente un tratado fundamental para el avance de los estudios magnéticos y ha sido aplicado y perfeccionado después por diversos autores con el uso de series polinómicas más complicadas pero mejor adaptadas a los objetivos que se pretendían en los análisis.

Esta segunda aportación de Gauss le llevó necesariamente a la tercera aportación: la creación de la Unión Magnética. Ya hemos visto que el trabajo de Gauss suponía el conocimiento de los valores magnéticos en diferentes puntos del Globo y naturalmente su exactitud; para lograr esta exactitud era necesario hacer las observaciones en sitios apartados de perturbaciones producidas por masas de hierro y por ello ya se habían construido casitas de madera, sin emplear en ellas el hierro, desde finales del siglo XVIII y una descripción de estos primitivos observatorios magnéticos se encuentra en las Philosophical Transactions de Londres del año 1796 y 1798 en las que Walter menciona el trabajo hecho por MacDonald en el observatorio del fuerte

Marlborough en Sumatra. Gauss que había sido nombrado Director del recientemente fundado Observatorio Astronómico de Göttingen, fundó al lado el primer gran Observatorio Magnético del mundo en el que junto con Weber, trabajó hasta el fin de su vida.

La idea de tener datos fiables de los valores magnéticos en diferentes partes del mundo no era nuevo y hemos visto algunos ejemplos en lo que llevamos expuesto: Humbolt a su vuelta de América había organizado observaciones magnéticas simultáneas en todo el Globo: su propuesta era que en cada año se fijaran ocho períodos de 44 horas en los que se hicieran observaciones de la brújula, por lo menos cada hora; Gauss y su colega Weber participaron en este esquema y se dieron cuenta que el intervalo horario era demasiado largo y propusieron que las observaciones se hicieran cada cinco minutos. El número de períodos por año se redujo de 8 a 3 ó a 6 y las horas de observación de 44 a 24. Así nació la llamada Unión Magnética de Göttingen en la que colaboraron de forma más o menos regular observatorios de los cinco continentes, entre ellos 35 en Europa; naturalmente no todos ellos pudieron cumplir todas sus observaciones en cada uno de los 28 períodos señalados por la Unión (3 en 1836, 7 en 1837, 6 en 1838 y 4 en cada uno de los años 1839 a 1841). Téngase presente que en estos años aún no se había descubierto el registro automático y que todas las observaciones tenían que hacerse visualmente: es fácil darse cuenta que realizar observaciones visuales cada cinco minutos durante 24 horas seguidas era un trabajo agobiante.

Las publicaciones de la Unión desde 1836 a 1841 contienen muchos y valiosos trabajos y son, aún hoy día, un claro ejemplo de lo que puede ayudar al progreso de la Ciencia la colaboración sincera y desinteresada entre diversas naciones.

OBSERVATORIOS MAGNÉTICOS

Los esfuerzos de Humbolt para que se abrieran observatorios magnéticos fueron secundados en varias naciones especialmente Inglaterra y Rusia que los establecieron no sólo en Europa sino también en las Colonias: citemos únicamente para no alargar la lista, el de Sitka en Alaska, entonces bajo dominio Ruso y los ingleses de El Cabo en Sud Africa, Bombay en la India, y Toronto en el Canadá. Los ingleses además planearon una expedición a los mares antárticos con dos barcos bajo el mando del Capitán J. C. Ross para que se hicieran, entre otras, observaciones magnéticas.

Era evidente que el sistema de observar las componentes magnéticas cada hora y peor aún cada cinco minutos, eran un trabajo ímprobo y que además de pesado se prestaba a no pocos errores. Para

evitarlo el Almirantazgo Británico instituyó un premio de 500 £ para quien inventase un método de registro gráfico; le fue concedido en 1848 a Carlos Brooke, que adaptó a los instrumentos un registro fotográfico; ya el año anterior lo había instalado en el Observatorio de Greenwich siendo Director G. B. Airy y había dado un resultado satisfactorio.

Aunque al principio se continuó en varios observatorios la práctica de la observación visual, el registro fotográfico fue extendiéndose progresivamente y pronto se dispuso de datos más numerosos y más exactos para continuar los trabajos magnéticos.

En 1850 Kreil, de Praga, a base de observaciones bihorarias de la Declinación hechas entre las 10 de la mañana y las diez de la noche entre los años 1840 y 1849 pudo demostrar que la Declinación en el promedio de toda la lunación estaba sujeta a una variación semidiurna semejante a la de la marea oceánica.

ACTIVIDAD SOLAR Y ACTIVIDAD MAGNÉTICA

Mucha mayor trascendencia para los estudios futuros tuvo el descubrimiento de la relación entre actividad solar y actividad magnética. También aquí el resultado se obtuvo por la puesta en conjunto de datos obtenidos por diversos autores: Schwabe en Alemania, entre 1826 y 1855, había empezado a observar regularmente las manchas solares y a llevar estadística de las mismas; hacia 1833 empezó a sospechar la existencia de un ciclo de unos diez años y en 1843 y 1844 publicó sus observaciones que tuvieron poca resonancia hasta que von Humboldt los dio a conocer junto con su extensión hasta 1850. Solamente un año después, Sabine, Superintendente de los observatorios Coloniales Británicos, anunciaba una variación paralela a la del ciclo solar en la perturbación promedio de la Declinación en Toronto. En el mismo año de 1852 Lamont describía la misma periodicidad en los datos de la amplitud de la variación diurna en Munich. Sucesivamente se fue encontrando la misma periodicidad en otros elementos magnéticos y quedó bien establecida la relación entre actividad magnética y solar.

No hay que creer, sin embargo, que estos resultados se obtenían sin vacilaciones e incluso errores; por ejemplo, Broun, Director de un observatorio privado en Escocia, anunció en 1858 una probable recurrencia de la perturbación magnética alrededor de las cuatro semanas y esta recurrencia fue encontrada también por otros autores y dado su periodo y quizás influenciados por los trabajos de Kreil sobre la marea lunar en magnetismo se atribuyó a un efecto lunar. No fue hasta comienzos del siglo xx cuando Maunder la asoció definitivamente con la rotación solar cuyo período relativo a la Tierra móvil es de unos 27 días. Este resultado fue interpretado como el efecto de una influen-

cia discreta y direccional del Sol; era ciertamente un paso adelante respecto de la relación señalada por Sabine y Lamont, que se refería únicamente a una influencia Global.

PRIMER AÑO POLAR

Toda esta serie de descubrimientos y muy especialmente la necesidad que los análisis esféricos de Gauss habían revelado, de observaciones fidedignas y simultáneas hechas en toda la Tierra, junto con las necesidades de otras ramas de las Ciencias de la Tierra, como la Meteorología, hicieron surgir idea de organizar a nivel mundial expediciones a las regiones polares para que llevaran a cabo observaciones simultáneas; era natural que se propusiera como objetivo primario las regiones polares, ya que por entonces se iba teniendo conciencia, en Meteorología, que las grandes tempestades se fraguaban en las regiones polares y en el magnetismo era obvia su importancia por la existencia en ellas de los dos puntos singulares del campo, los polos magnéticos, y por la aparición en ellas de las auroras. La idea, propuesta por el Teniente de Navío Carlos Weyprecht, alemán al servicio de la Marina Austro-Húngara, fue patrocinada por el Príncipe von Bismarck, por el Conde de Wilzeck y por otros y se puso en práctica en los años 1882 y 1883. Sus objetivos fundamentales fueron la Meteorología y el Magnetismo, incluyendo en él las auroras. La respuesta de muchas naciones fue magnífica y se organizaron quince expediciones, además de las estaciones en bajas latitudes que contribuyeron a ellas. Los resultados quizás no respondieron al esfuerzo realizado, probablemente por falta de un organismo central que recogiera los datos y elaborara los resultados; pero el impulso que dio a los trabajos magnéticos fue muy notable.

CORRIENTES EN LA ALTA ATMÓSFERA

Si el período que va de Gilbert a Gauss se caracterizó por el trabajo sobre el campo magnético interno y su variación secular, con un conocimiento de la variación diurna y estacional, el período que va desde Gauss al Año Geofísico Internacional se caracteriza principalmente por el estudio de las variaciones del magnetismo externo y por la búsqueda de sus causas. Aunque sea generalizando quizás demasiado, se desplaza el interés de las capas internas de la Tierra a las capas superiores de la atmósfera.

Ya hemos indicado que por el análisis de Gauss se podía separar la componente interna de la externa en el campo magnético observado

en las estaciones; y si no se conocía la causa por la cual la Tierra se comportaba como un imán, por lo menos se conocía su valor, su distribución en el Globo y se podía calcular matemáticamente por los procedimientos enseñados por Gauss y aplicando la teoría del Potencial de Newton; pero, ¿por qué había variaciones diurnas y estacionales regulares y otras de más largo período dependientes de la actividad solar? y, finalmente, ¿por qué había otras perturbaciones rápidas, algunas de ellas asociadas, como hemos visto, con las auroras polares? ¿Cuál era el vínculo que servía de nexo entre la actividad solar y los movimientos de los imanes?

Ya en 1882, Steward, en la Enciclopedia Británica, discute las causas de la variación diurna y empieza por rechazar una serie de hipótesis que se habían formulado: la primera que rechaza es la que afirmaba que la variación diurna era debida a una acción directa e inmediata del Sol, porque el campo magnético solar es un campo magnético débil y su acción sobre la Tierra es despreciable; rechaza también las hipótesis que se habían formulado atribuyendo la amplitud de la variación diurna a un efecto paramagnético del oxígeno atmosférico, que es mayor al calentarse, ya que el efecto en la atmósfera es muy pequeño e insuficiente para explicar los valores de la variación magnética; esta teoría, que se basaba en el efecto descubierto por Faraday hacia 1850, no es más que otro caso de procurar aplicar a fenómenos cuya causa se desconoce, los más recientes avances científicos en campos afines; tampoco acepta la explicación propuesta por Christie, Mosser, de la Rive y otros, que entre 1827 y 1849 han intentado explicar la variación diurna magnética por corrientes termoeléctricas, porque el Sol no puede producirlas con su calentamiento, ni en la atmósfera ni en la corteza; tampoco acepta otras hipótesis que se habían formulado y que atribuían el fenómeno a corrientes telúricas que fluían en la corteza terrestre o a movimientos de las masas de aire. Por exclusión formula la hipótesis que la alta atmósfera es el lugar de corrientes eléctricas producidas por el Sol y que por el movimiento diurno relativo Sol-Tierra, se mueven cortando las líneas del campo magnético terrestre y así producen unas corrientes secundarias que son las que mueven los imanes a lo largo del día; la dificultad que se presenta, obvia para los conocimientos de su tiempo, que la conductividad del aire es demasiado pequeña para producir corrientes suficientemente intensas, la resuelve intuitivamente, pensando que en las capas altas de la atmósfera la conductividad quizás sea mucho mayor. Hoy sabemos que su intuición era exacta; y su teoría se conoce como la de «la Dinamo Atmosférica», en la que la Tierra es el magneto y el aire la armadura. Notemos que con esta teoría la variación diurna pasa a ser de un fenómeno cortical a un fenómeno de la atmósfera, pero aún no se formula teoría alguna que explique el nexo entre el sol y la atmósfera.

En 1887, A. Schuster aplicó el análisis esférico de Gauss a los datos de la Variación diurna y encontró que la mayor parte de la misma era de origen externo, confirmando con esto la teoría de Stewart, y que la parte interna podía explicarse por corrientes telúricas inducidas en la corteza por las corrientes externas. El mismo Schuster dio en 1909 la formulación matemática de la Dinamo Atmosférica calculando la intensidad de las corrientes eléctricas que debían fluir en la atmósfera para producir el efecto magnético deseado. El análisis armónico de Schuster fue repetido y ampliado a nuevos datos por diversos autores como Frische, Walker, van Vleuten, van Bemmelen y Chapman, entre 1902 y 1919. Van Bemmelen y Chapman también analizaron la variación magnética diurna producida por la luna. El resultado de estos y otros trabajos fue el postular unas corrientes eléctricas en la alta atmósfera cuyo efecto sobre los imanes en la Tierra reprodujera la variación diurna (solar y lunar), estacional, etc.

TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Al mismo tiempo se había adelantado en el conocimiento de las tempestades magnéticas. Parece que fue J. A. Broun quien llamó la atención sobre el descenso de la componente horizontal pero fue N. A. F. Moos quien, en 1910 con los datos del observatorio de Colaba, junto a Bombay, describió las tempestades magnéticas que él llamó X (las que hoy conocemos como de comienzo brusco) en ellas se aprecia en la componente H y en la primera hora después del comienzo un aumento de unas 26 nT desde el nivel anterior al salto brusco; a este aumento sigue un fuerte descenso con un máximo de unas 86 nT a las 10 horas y después viene una progresiva recuperación que no es todavía completa a las 24 horas de comenzada la tempestad. El procedimiento usado por Moos de ordenar las tempestades y sus valores horarios, no según el Tiempo Universal o Local, sino según el principio de la tempestad, es decir, según el que se hallado Tiempo de la Tempestad, ha sido ampliamente usado después por muchos autores para estudiar las variaciones que las tempestades introducían en la marcha diurna de la variación magnética propia de los días de calma y en otras investigaciones. Moos halló también, por el mismo procedimiento, que los cambios en D y Z eran pequeños, comparados con las variaciones en H.

Con el trabajo de Moos quedó fijada la morfología general de las tempestades magnéticas de comienzo brusco, mucho mejor que con la clasificación dada por Birkeland, que en sus memorias de los años 1901, 1908 y 1913 (resultado de sus expediciones polares) distingue

las tempestades polares en cinco clases: tempestades polares (positivas y negativas), tempestades ecuatoriales (también positivas y negativas) y, tempestades ciclomedias; hay que notar, con todo, que en los trabajos de Birkeland, sus «tempestades» no son exactamente lo mismo que en Moos; se trata más bien, de la forma en que se manifiestan en las regiones polares, perturbaciones magnéticas de carácter más corto y que, en general, se han identificado después, aunque no únicamente, con lo que ahora llamamos bahías geomagnéticas.

Al hablar de la variación diurna (solar y lunar) del campo geomagnético hemos indicado que se explicaba por unas corrientes eléctricas producidas por la radiación solar en la alta atmósfera; la parte principal de la tempestad se atribuye también a la formación de otro sistema de corrientes en la alta atmósfera, que produce el descenso del valor de la componente horizontal. Ya, en 1911-1912, Störmer postula la creación de una corriente de anillo muy grande, quizás más allá de la órbita de la Luna; en 1930-1932, inmediatamente antes del II Año Polar, Chapman y Ferraro dan su teoría, en la cual, la corriente de anillo tiene un diámetro mucho menor. Hemos de citar también la teoría de Hulburt y Morris que, en 1928-1929, indican que la primera fase de la tempestad es producida por corrientes en la alta atmósfera, mientras que la segunda fase es causada por corrientes inducidas en el interior de la Tierra.

En este punto era natural preguntar cuál era la causa que producía dichas corrientes. La estrecha relación entre las tempestades magnéticas y las auroras, hallada por Hiorter en 1747 y observada por Halley en 1716, junto con trabajos de varios autores que relacionan la actividad auroral con la solar, como Fritz que, en 1881, encuentra la recurrencia de las auroras en 27 días, o Boller que, en 1898, encuentra el ciclo undecenal en las auroras australes, y los trabajos de Birkeland con su terrella imantada y los de Störmer, que da formulación matemática a las ideas de Birkeland, han establecido el origen solar de las tempestades magnéticas.

También aquí hubo dudas y contradicciones antes de llegar a esta conclusión; es conocida la afirmación de Lord Kelvin en una comunicación a la Royal Society de Londres, en 1892, en la que afirmaba que no hay relación alguna entre el Sol y las tempestades magnéticas y, en especial, que las relaciones entre el Sol y las auroras y entre las manchas solares y las tempestades magnéticas, no son más que ilusiones estadísticas. Con esta cita no pretendemos, ni mucho menos, quitar ni un ápice de valor a la valiosísima aportación de Lord Kelvin a la física moderna, queremos únicamente señalar la dificultad con que las ideas científicas se van abriendo camino.

El descubrimiento de la radiactividad con la de los rayos X ayudó ciertamente a establecer la teoría corpuscular de las auroras y los ex-

perimentos con la terrella imantada de Birkeland y de Villard parecían demostrar que las auroras eran fruto de un bombardeo de la Tierra imantada por chorros de rayos catódicos y sin embargo, L. Vegard, que continuó los trabajos de Birkeland, prefirió, en 1912 y 1916, que la radiación solar que produce las auroras no sea una radiación catódica sino que sea una radiación anódica, es decir, el elemento productor no serían partículas negativas sino positivas.

Estas dudas y contradicciones no tienen nada de particular ya que por entonces no se conocía la existencia de la ionosfera ni se tenían datos suficientemente completos sobre la radiación solar: todavía en 1924, B. Chauveau, en su libro «Electricité Atmosphérique» escribía: «no tenemos datos sobre la extensión real del ultra-violeta solar más allá de la longitud de onda de 0,3. Nada nos hace creer que la luz solar no contenga radiaciones muy refrangibles; tampoco nada nos hace suponer que las contenga. Se puede suponer, verosímilmente, que radiaciones del dominio de Schuman y de Lyman no están totalmente ausentes en la radiación solar».

Es también interesante a este respecto el recuerdo de la cita que hace el mismo Chauveau de los trabajos de Larmor en 1884; según ellos una capa conductora en rotación suficientemente rápida puede actuar para los puntos interiores como una pantalla casi perfecta que impida, sobre estos puntos interiores, el efecto de variaciones magnéticas exteriores a causa de las corrientes de inducción que se engendran en esta capa; ahora bien, según el mismo autor, el cálculo demuestra que la conductividad de la atmósfera para que haga este efecto de pantalla es del mismo orden del que es necesario para que en ella se engendren las corrientes postuladas por la teoría de Schuster. Es interesante esta indicación porque señala la imposibilidad de una influencia directa de las variaciones del campo magnético solar sobre el campo magnético terrestre y al mismo tiempo de la existencia de las corrientes eléctricas en la alta atmósfera. Hay que admitir pues que la atmósfera actúa como barrera, o si se quiere, como elemento conversor, como «dinamo» según la expresión de Schuster o como «relé» según la de Bosler, para que la energía proveniente del Sol se transforme en las altas capas en corrientes eléctricas que a la vez produzcan los efectos magnéticos observados.

NEXO SOL-TIERRA

Quedaba por resolver cuál era el nexo entre el Sol y la Tierra: ¿luz o partículas? Ambas teorías tuvieron sus partidarios, aunque se fue imponiendo la idea que no era la luz ultravioleta, sino que son las

partículas las que producen dichas corrientes. Aún en 1940, después del II Año Polar, Chapman y Bartels resumen las teorías en dos grandes grupos: según que se considere que el agente es la luz ultravioleta solar o que es un chorro de partículas emitidas por el Sol; en este último caso el chorro de partículas puede ser neutro o estar cargado eléctricamente. Las teorías de Hulburt y Maris, según las cuales las tempestades magnéticas están producidas por partículas de origen terrestre, no ha sido confirmado y ya no tiene aceptación.

LA IONOSFERA

Un hecho importante para el adelanto de estas teorías tuvo lugar en 1901 cuando el Prof. Guillermo Marconi, desde su yate «Alberto Carolo» anclado en Portsmouth, logró radiar su mensaje a la Spezia primero y a Newfouland después. Como que ya desde Maxwell había quedado demostrada la naturaleza electromagnética de las ondas de radio, iguales, por tanto, en su naturaleza íntima a las de la luz, aunque de mayor longitud de onda, había que buscar alguna hipótesis que permitiera explicar cómo estas ondas se podían haber propagado hasta tan distintos lugares salvando la curvatura de la tierra.

Múltiples fueron las hipótesis hechas para explicar esta propagación por los medios entonces conocidos; entre ellos es posible citar los trabajos de eminentes físicos y matemáticos como Mac Donald, Rayleigh, Van der Pool y otros; todos ellos dieron resultados negativos; es más, Poincaré, en una extensa memoria sobre la propagación de ondas sobre una esfera conductora demostró que, con las hipótesis entonces existentes, era imposible explicar el hecho y que había que introducir nuevas hipótesis. Esto fue hecho, casi simultáneamente e independientemente, en 1902, por Heaviside en Inglaterra, Kenelly en Estados Unidos y Nagaoka en el Japón: estos autores postularon la existencia en la alta atmósfera de una capa altamente ionizada que actuara como espejo reflector de las ondas de radio y permitiera así vencer por reflexiones sucesivas en ella y en la Tierra la curvatura de ésta. Esta capa fue conocida, casi generalmente, con el nombre de capa de Heaviside y es la que hoy llamamos «Ionosfera».

Es natural que una hipótesis de este tipo, unida a la rápida difusión de la radiotelegrafía, estimulara a los físicos a continuar los estudios teóricos y a buscar la comprobación experimental de los mismos. Uno de los primeros en dar una explicación teórica fue Eccles, que en 1912, vio que se debía modificar la primera concepción de una capa reflectante; según su hipótesis la capa debería estar compuesta de iones y electrones cuya densidad aumentaría con la altura; al penetrar una onda de radio en esta capa de mayor densidad se refractaría en ella

tanto más cuanto más penetrara hasta llegar a la refracción total, que era cuando la onda volvía a la Tierra. Esta teoría, modificada y completada por Larmor en 1924, es hoy la base de los trabajos sobre la ionosfera y ha puesto el fundamento necesario para explicar las corrientes eléctricas postuladas por el magnetismo.

Los esfuerzos de los físicos para obtener una prueba directa de la existencia de la capa Heaviside fueron coronados por el éxito en 1925, cuando Appleton y Barnett e inmediatamente después, cuando Smith-Rose y Barfield, lograron obtener ecos de ondas reflejadas en dicha capa. A los métodos interferométricos empleados en los primeros trabajos, sucedió el método de impulsos, que es el que hoy se emplea más generalmente; en 1925, G. Breit y M. Tuve, publicaron su trabajo en el que daban cuenta de su experimento: enviando, por medio de un emisor, unos impulsos de muy breve duración, se recibían, no sólo uno, sino dos y a veces más impulsos en un receptor situado a pocos kilómetros de distancia. La explicación de la recepción de estos impulsos era fácil: el primer impulso recibido correspondía al rayo directo, mientras que los impulsos sucesivos, o ecos, eran producidos por las refracciones totales o reflexiones en la Ionosfera. Por este método empleado hoy en las estaciones ionosféricas establecidas en todo el globo, se ha podido conocer la constitución de estas capas ionizadas de la alta atmósfera, desde unos 80 kilómetros hacia arriba.

Naturalmente, el descubrimiento de la existencia de la capa ionosférica había provisto al magnetismo del soporte físico necesario para las corrientes eléctricas; pero aún subsistía el problema de cómo éstas se formaban en la Ionosfera e incluso de cómo se formaba la misma Ionosfera.

SEGUNDO AÑO POLAR

Un nuevo impulso a todos estos estudios lo dio el II Año Polar propuesto por el Almirante Dominik, Director del Deutsche Seewarte de Hamburgo, para conmemorar el cincuentenario del Primer Año Polar. La idea fue muy bien aceptada, en 1927, por el Prof. Simpson, Director del Meteorological Office de Londres y después por la Organización Meteorológica Mundial. En 1929, la Conferencia de Directores de Servicios Meteorológicos, reunida en Copenhague aprueba el anteproyecto, presentado por Everdingen y nombra director de la Comisión Internacional del Año Polar 1932-1933 al Dr. La Cour.

No es este el momento de describir los trabajos llevados a cabo en el II Año Polar, en el que España colaboró reforzando sus estaciones en la Península y de modo muy significativo, estableciendo un observatorio magnético temporal en Moca (Fernando Poo). Cifñendonos al

magnetismo baste decir que se fijaron tres objetivos, que eran consecuencia natural de los avances realizados hasta el momento y de los problemas que estos mismos avances habían ido planteando:

- 1) representación del Campo Magnético Global por coeficientes de Gauss;
- 2) estudio de la variación del campo magnético;
- 3) estudio de las teorías de Birkeland y de Störmer sobre las auroras y su relación con las tempestades magnéticas.

Este Segundo Año Polar fue un éxito de colaboración internacional y sus resultados científicos fueron claramente superiores a los del Primer Año Polar, en gran parte debidos al trabajo de coordinación dirigido por el Prof. La Cour. Hasta 1954 no se disolvió la Comisión Liquidadora del Segundo Año Polar, después de haber publicado los datos obtenidos.

En los 25 años que transcurren entre el Segundo Año Polar y el Año Geofísico Internacional, se intensifican los trabajos sobre las variaciones no periódicas del campo magnético y se procura explicarlas por sistemas de corrientes equivalentes en la atmósfera exterior.

TEMPESTADES MAGNÉTICAS

Ya hemos hablado de las tempestades magnéticas y del estudio que hizo Moos de las de comienzo brusco. Chapman y Ferraro (1931 y siguientes) procuraron explicar la primera fase de la tempestad magnética por la llegada a la Tierra de un chorro de partículas emitidas por el Sol; al interferir con el campo magnético terrestre se formaba una concavidad en el chorro y las trayectorias de las partículas del chorro, cargadas positiva y negativamente, engendraban en la superficie de la concavidad unas corrientes eléctricas que explicaban la primera fase de la tempestad, aunque no pudieron explicar la fase principal. Después veremos cómo se ha procurado explicar esta fase principal por otro sistema de corrientes eléctricas, aunque se haya desistido, en cierto modo, de la corriente para explicar la primera fase.

Uno de los datos que sirvió para relacionar las tempestades magnéticas con la actividad solar fue el descubrimiento de Maunder de la recurrencia de 27 días de las manchas solares, que coincidía con la recurrencia hallada para las tempestades magnéticas pero esta recurrencia presentaba no pocas dificultades: en primer lugar, las mayores tempestades de comienzo brusco no eran las que presentaban un mejor índice de recurrencia y además había otro tipo de tempestades mag-

néticas que no comenzaban con un salto brusco sino que tenían un comienzo gradual y luego no presentaban claramente la fase de fuerte descenso en la componente horizontal ni la consiguiente recuperación; estas tempestades sí que tenían un alto índice de recurrencia de 27 días. Estos hechos hicieron que se avanzase en la idea que las tempestades magnéticas estaban relacionadas con la actividad solar, uno de cuyos índices más útiles es el número de manchas, pero que no estaban directamente relacionadas con las manchas sino con unas regiones solares, fijas en la superficie del Sol y no identificadas, que Bartels (1934) llamó regiones M.

EFFECTOS DE FULGURACIÓN SOLAR

Entre las variaciones no periódicas del campo magnético, además de las tempestades magnéticas, se conocían desde antiguo otras perturbaciones de período más corto, lo que hoy llamamos Variaciones Magnéticas Rápidas: efectos de fulguraciones cromosféricas, bahías, pulsaciones, etc.

Parece ser que la primera observación del efecto casi simultáneo de una erupción solar y de una perturbación de poca duración del campo magnético terrestre se remonta al 1 de septiembre de 1859, en que Carrington observó en luz blanca una erupción cromosférica que produjo una variación magnética de corto período, pero no fue hasta después del II Año Polar cuando, en 1935, Jouast y Dellinger llamaron la atención sobre la conexión entre fulguraciones solares y variaciones magnéticas rápidas (sfe) y su repercusión en los radio fade-out; el 8 de abril de 1936 se observó en Huancayo una erupción solar muy fuerte que fue acompañada de un sfe en magnetismo y telúricas, de un radio fade-out y de una absorción anómala en la ionosfera; en 1936 Fleming y en 1937 McNish establecen que el sfe es un aumento de la variación diurna, y en 1937 Delinger hace un estudio estadístico de más de 100 radio fade-outs y demuestra que la mayoría de ellos tienen repercusión magnética.

Al producir la erupción cromosférica solar un aumento de la ionización y por tanto de la conductividad eléctrica de la ionosfera en el hemisferio iluminado, se interpretó su efecto como un aumento del sistema de corrientes que eran causa de la variación diurna. Sin embargo el sistema de corrientes que producían, deducido por varios autores, como Volland y Taubenheim (1958), Velkamp y Van Sabben (1960), Ohshio y otros (1963) muestran que las corrientes del sfe tiene su centro desplazado del punto subsolar a veces se extienden al hemisferio noche y han de estar situadas en una capa de la ionosfera inferior a la capa en que fluyen las corrientes de la variación diurna; la distin-

ción entre estos dos sistemas de corrientes me permitió encontrar una sencilla explicación del por qué en algunas estaciones y horas el efecto de la fulguración cromosférica no se manifiesta como un aumento de la variación diurna de la componente horizontal sino que presenta una disminución de la misma, lo que en la nomenclatura del Servicio de Variaciones Magnéticas Rápidas se conoce como un «sfe invertido».

BAHÍAS

Otro tipo de Variaciones Rápidas es el que se conocía internacionalmente con el nombre de comienzos bruscos polares (polar sudden commencements) o por sus siglas en inglés «psc». Su nombre se deriva, probablemente, de los trabajos de Birkeland sobre las tempestades magnéticas polares e incluía dos tipos de fenómenos: las bahías geomagnéticas y las pulsaciones.

Las bahías geomagnéticas, así llamadas en 1912 por Chree, a causa de la forma en que se manifiestan en los magnetogramas, semejante a las bahías geográficas en los continentes, habían sido ampliamente estudiadas por diversos autores a principios del siglo xx y habían sido sujetas a análisis armónicos del tipo de Gauss y Schuster. Se conocía también su asociación con las pulsaciones y por ello los «psc» incluían bahías con y sin pulsaciones y pulsaciones sin bahía.

En 1954 se creó, en la Asamblea de Roma de la Asociación Internacional de Magnetismo, el Comité para las Variaciones Magnéticas Rápidas y para las Corrientes Telúricas, cuyo primer Presidente fue el P. Antonio Romañá; en 1956 se suprimió el término «psc» y fue sustituido por el de «b» bahías: (bs, bp, bps: según fueran de comienzo brusco, con pulsaciones o con ambas características). Con ello se dio un impulso al estudio de las pulsaciones al separarlo del de las bahías.

Uno de los resultados bien establecidos en magnetismo es el predominio de las bahías en horas nocturnas; para no hacernos interminables citaremos únicamente algunos trabajos en los que se establece dicho fenómeno. Chree (1912) encuentra para Kew en Inglaterra que las bahías en la Declinación son más frecuentes por la tarde; Moidrey, s.l. (1917) halla un claro máximo, para las bahías registradas en Zi-ka-wei, entre las 19 y las 22 h; Steiner (1921) halla el máximo para O'Gialla, en Hungría entre las 22 y las 24 h.; resultados semejantes han sido presentados por Lübigger (1924) para Samoa y por Wiechert (1934) para Gross-Raum, en Alemania; Maurain y Coulomb (1943) encuentran el máximo de bahías registradas sucesivamente en los Observatorios de Parc Saint-Maur, Val Joyeux y Chambon-la-Forêt, cercanos a París, entre las 22 y las 23 h.; Meyer (1951) sitúa en máximo a las 21 en Wingst (Alemania); en Africa. Billaud (1953) lo halla a

las 23-24 h. en Tamanrasset; en 1952 Fukushima y Ono al estudiar la perturbación del vector bahía en los Observatorios de Cheltenham, Tucson, Sitka y Honolulu, dan un cuadro del que se deduce que la hora del máximo de las bahías para estos Observatorios tan separados geográficamente, Sitka en Alaska y Honolulu en el ecuador, las 21 y las 24 h.

Otros autores han clasificado las bahías según su variación en el plano horizontal y de ellos se deduce también que el máximo ocurre poco antes de la medianoche; entre ellos citamos la tesis doctoral de J. M. Príncipe, hecha en el Observatorio del Ebro (1949) y en la que establece la ley de sucesión de los tipos de bahías a lo largo del día, el máximo total se halla entre las 21 y las 23 h. Su extensión a los Observatorios de Cheltenham, Tucson y San Juan (1954) confirma el máximo nocturno; Romañá (1950) halla para los Observatorios mejicanos el máximo entre las 20 y las 21 horas.

Al referirme a estos trabajos no puedo dejar pasar por alto una de las primeras experiencias personales en este campo: al incorporarme definitivamente al Observatorio del Ebro, tanto el P. Romañá como el Dr. J. M. Príncipe se hallaban trabajando en el tema de las bahías y pareció que podría ser útil empezar un trabajo en el que entrasen los datos de bahías (psc) que se publicaban en los Boletines Anuales de la Asociación Internacional de Magnetismo y Electricidad Terrestre correspondientes a los años 1950-1954; los psc que figuran en estas listas definitivas son los que han sido comprobados por los diversos observatorios a base de las listas preparadas por el Comité Internacional con los datos que cada observatorio iban dando cada mes. El número de fenómenos registrados en los 5 años fue de 1251 y el de observatorios participantes era 38. Las horas de las bahías se dan en el Boletín en tiempo universal y el resultado del análisis fue que el máximo de las bahías ocurría poco antes de la medianoche en tiempo universal, en contra de lo encontrado por los autores mencionados anteriormente, según los cuales el máximo ocurría antes de la medianoche, pero en tiempo local. A primera vista el número de fenómenos registrados y el de observatorios empleados era muy suficiente para aceptar el valor estadístico de los resultados y los datos iniciales del Boletín de la Asociación Internacional parecían tener toda la garantía necesaria. Sin embargo el error provenía de la forma en que se seleccionaban los datos: el sistema ideado por el Comité Internacional para asegurarse que los psc que figuraban en el Boletín anual eran fenómenos verdaderos y no producto de una interpretación más o menos optimista de los observadores era el siguiente: cada mes se hacía la lista con todos los psc dados, con indicación de la hora (en tiempo universal) y de los observatorios que los habían dado; de las doce listas mensuales se hacían cuatro resúmenes trimestrales de las que se eliminaban los psc

que habían sido dados por un sólo observatorio y con estas listas se confeccionaba la lista de comprobación anual que era revisada por cada Observatorio; finalmente únicamente pasaban a la lista final, en los años 1951 y 1952, los confirmados por lo menos por diez Observatorios; en los años 1950, 1953 y 1954 entraban en la lista todos los psc confirmados por un solo observatorio. Téngase presente que la distribución en longitud de los observatorios que colaboraban en el Servicio era muy variable: así, en los husos horarios 0 y 1, correspondientes a Europa y Africa había 17 Observatorios, con otros seis husos (4, 5, 6, 7, 11 y 13) que no tenían ningún observatorio colaborador. Supongamos ahora que los psc dependieran realmente del tiempo local y que por tanto, por lo menos, para algunos de ellos, su área de manifestación no fuese todo el mundo; al exigir en las listas de los años 1951 y 1952, que fueran confirmados por lo menos por 10 observatorios, podía suceder que en su área geográfica no existieran los 10 observatorios que lo pudieran confirmar. Y aún en los otros años en los que no se pedía esta restricción, quedaba la de que no pasaban a las listas de comprobación más que los que habían sido dados por dos o más observatorios, lo cual todavía primaba los psc observados en los husos euro-africanos, como puede verse fácilmente: un psc dado por dos observatorios europeos, es decir por un 22 % aproximadamente de los observatorios de su huso, pasaba a las listas de comprobación, y por tanto tenía probabilidad de ser incluido en las listas definitivas; en cambio, otro psc observado en Toolangui, único observatorio de su huso y por tanto observado en un 100 %, quedaba automáticamente excluido. Era pues necesario rehacer todo el trabajo prescindiendo de las «perfectas» listas filtradas y usar los datos mensuales dados directamente, a pesar de las inhomogeneidades que ciertamente contenían. Rehecho el trabajo, reuniendo los datos originales de los observatorios por husos horarios, apareció en todos ellos el máximo nocturno en hora local y desapareció, por tanto, el máximo nocturno en tiempo universal.

Si me he extendido más de la cuenta en esta experiencia personal, ha sido no sólo porque se me gravó profundamente, quizás por ser de las primeras, sino fundamentalmente porque creo que indica el cuidado extremo que hay que tener en todos estos trabajos en los que una, relativamente pequeña, manipulación de los datos, por otra parte fiables, puede llevar a conclusiones completamente erróneas. Y si esto es así, hay que extremar la atención en el uso que se hace de los datos y tener comprensión cuando uno se encuentra con errores en los trabajos de otros, debidos, a veces, a usar estadísticas no aplicables al enfoque que el autor les da o que se han usado a base de hipótesis sobre fenómenos todavía no completamente establecidos.

Dejándonos ya de estas consideraciones y volviendo al tema del desarrollo del Magnetismo Terrestre, hemos de decir que, lo mismo

que con otras variaciones del campo magnético, se aplicó a las «bahías» el análisis armónico y se determinaron los sistemas de corrientes en la alta atmósfera que podían producirlas; son conocidos en este punto, los trabajos de Vestine, Fukushima y de otros muchos; al mismo tiempo otros autores preferían explicar las bahías por corrientes eléctricas en la zona auroral producidas por precipitación de partículas en esta zona.

PULSACIONES

Las pulsaciones eran ya conocidas desde que Balfour Stewart las infirió de los registros de Kew en la tempestad del 28 de agosto de 1859; en 1897, Eschenhagen las denomina «ondas elementales» y en 1902, van Bemmelen, en Batavia, les da el nombre de «pulsaciones». Las primeras que merecieron la atención de la Asociación Internacional de Magnetismo fueron las llamadas pulsaciones gigantes; las menciona en 1931 Rolf por haberlas observado en Abisko. Para su estudio, la Asamblea General de 1936, en Edinburgo, creó un comité con el fin de organizar observaciones en Islandia con la finalidad de investigar sobre las pulsaciones gigantes; su trabajo fue continuado después de la Segunda Guerra Mundial por el Comité sobre Pulsaciones Gigantes. Estas pulsaciones parecen producirse cerca, pero no dentro, de la zona auroral y afectan regiones limitadas del Globo, aunque han llegado a registrarse muy cerca del ecuador, en Tamanraset. Además de las pulsaciones gigantes, se conocían otras pulsaciones y se había estudiado su frecuencia diurna; así Lubiger, en 1935, encuentra un máximo nocturno, mientras que Sucksdorf, con datos de 1932 a 1935, describe pulsaciones de corto período (menor de dos a tres segundos) y que presentan un máximo diurno; aún no se distinguen claramente los dos tipos de pulsaciones que en la Asamblea de Toronto, en 1957, ya adquieren carta de naturaleza con las denominaciones «pt» y «pc», es decir, «trenes de pulsaciones» y «pulsaciones continuas», siendo las primeras un fenómeno preferentemente nocturno, y diurno las segundas. Señalemos a este respecto que, ya en 1948, Hakateyama había encontrado los dos tipos en los registros de corrientes telúricas.

Más adelante, estos dos grupos se dividieron en subgrupos, cambiando el nombre de pt por el de pi (pulsaciones irregulares) (pi 1 y pi 2; pc 1, pc 2, pc 3 y pc 4) según su período a los que se han añadido muy recientemente los pi 3 y pc 5.

La Asamblea de Toronto en septiembre de 1957 a la que nos acabamos de referir coincide casi exactamente con el comienzo del Año Geofísico Internacional (1957-58).

AÑO GEOFÍSICO INTERNACIONAL (AGI)

La idea de celebrar una campaña mundial semejante a la de los Años Polares, fue propuesta por el Prof. Lloyd Berkner, en 1950, para aprovechar los rápidos avances que se habían hecho, tanto a nivel científico como técnico, desde el II Año Polar, 25 años antes; la aceptación de la idea fue entusiasta: se planearon expediciones a remotas regiones del Globo, se instalaron numerosos nuevos observatorios y se incluyeron hasta doce disciplinas en el campo de la Geofísica; por su mayor envergadura y extensión geográfica se prefirió no darle el nombre de III Año Polar, sino el de Año Geofísico Internacional.

No es éste el momento de describir la magna cooperación internacional que se desarrolló, en prácticamente todos los campos de la geofísica; nos tenemos que contentar con lo que sucedió con el Geomagnetismo ya que desde este Año Geofísico, ha cambiado radicalmente, de modo que es éste el tercer «punto estelar» al que nos referíamos anteriormente y lo es, si cabe, con mucha mayor razón que los anteriores. Si antes los dos puntos estelares habían tenido como protagonistas dos hombres: Gilbert y Gauss, ahora el gran protagonista fue la tecnología al servicio del hombre.

Uno de los grupos de trabajo incluidos en el Año Geofísico era el de los «Cohetes y Satélites», en el que Estados Unidos y Rusia querían participar para poder hacer mediciones «in situ» en la alta atmósfera y fuera de ella. Los resultados fueron tan sorprendentes que, por lo que respecta al magnetismo, se ha iniciado una nueva era, que es absolutamente diferente a la anterior. Antes del AGI el hombre estaba confinado a la superficie de la Tierra y conocía los otros mundos que pueblan el espacio por medio de las radiaciones que nos llegan de los mismos; y aún estas radiaciones quedaban filtradas por la atmósfera; los globos sondas se elevaban en la atmósfera y procuraban captar alguna de las radiaciones que ésta absorbe. Un primer e importante paso para vencer estas limitaciones fueron los cohetes que se emplearon con éxito en la exploración de la alta atmósfera; por medio de cohetes se había podido observar, antes del AGI, la existencia de corrientes eléctricas en la alta atmósfera y se había fotografiado el espectro de la luz ultra-violeta mucho más allá de lo que permitía la absorción producida por la capa de ozono atmosférico. No es pues de extrañar que desde el primer momento se crease en el AGI un grupo de «cohetes» para la exploración de la alta atmósfera.

Pero el uso de cohetes tenía sus graves limitaciones: su costo era muy elevado, el tiempo de experimentación muy corto y las condiciones de observación difíciles a causa de la velocidad a que tenían que desplazarse; además, la altura a que podían elevarse, aunque muy superior a lo logrado anteriormente, no satisfacía las necesidades previstas.

Por todo ello no tiene nada de particular que, desde muy pronto, se pensase utilizar los cohetes, no como portadores de aparatos de observación, sino como lanzadores de laboratorios, que una vez puestos en el espacio, quedasen como pequeños satélites artificiales girando alrededor de la Tierra y pudiesen, durante su permanencia en el espacio, verificar observaciones desde la alta atmósfera y aún desde fuera de ella.

En este sentido se orientaba una resolución del Comité Internacional del AGI en su reunión de Roma en 1954. La idea fue tomada en consideración por el Comité Nacional de Estados Unidos que en la reunión de Bruselas de 1955 anunciaron su programa de satélites; en la reunión de Barcelona en 1956 los rusos comunicaron su intención de unirse al programa. Aún recuerdo la excitación que produjeron estos anuncios y los comentarios que se hacían sobre su posibilidad, sobre las dificultades que tendría la observación y la transmisión de los datos. Todo esto es ya historia pasada y las realidades están bien presentes y hechas objeto de uso cotidiano con los satélites de comunicaciones y con los numerosísimos satélites artificiales que giran en el espacio recogiendo continuamente datos científicos o sirviendo de estaciones habitadas.

CAMPO MAGNÉTICO Y PLASMA

El primer anuncio del cambio inminente que iba a producirse, lo dio el Sputnik II, que el 7 de noviembre de 1957 al volar sobre territorio ruso, a una altura de 225-270 km detectó, más allá del paralelo 60 un aumento extraordinario del número de partículas. Como que según lo que se sabía entonces de la atmósfera, a aquellas alturas no podía haber tantas partículas, se supuso que, a causa de las condiciones extremas de temperatura y presión a que trabajaban los aparatos, éstos se habían averiado. Pero el Sputnik III, lanzado el 15 de mayo de 1958, equipado con medidores de partículas, y los dos primeros satélites americanos, Explorer I (1958 a) y Explorer III (1958 b) encontraron altas concentraciones de partículas, con lo cual se rechazó la posibilidad de error en los aparatos.

La explicación física de estas observaciones la dio el americano Van Allen al afirmar que el campo magnético terrestre atrapaba partículas eléctricas que procedían del exterior y las organizaba en dos anillos alrededor de la Tierra situados a unos 1.5 y 3.5 radios terrestres.

CAMPO MAGNÉTICO CONFINADO

A la sorpresa causada por los anillos de Van Allen vino a sumarse pronto otra nueva: el 11 de octubre de 1958 se lanza el Pioner I, que mide el campo magnético entre 3.7 y 7 Rt y entre 12.3 y 16.6 Rt; mientras en las primeras mediciones se registra un campo magnético que sigue la ley del potencial newtoniano, en las segundas se observa alrededor de los 14 Rt una fuerte disminución del campo y rápidas fluctuaciones del mismo. Los siguientes satélites continúan investigando el fenómeno y hay que admitir finalmente que el campo magnético no se extiende hasta el infinito, sino que queda confinado alrededor de la Tierra por una superficie de revolución, que en la dirección del Sol, se sitúa a unos 10 Rt; más allá de los 14 Rt el campo uniforme y débil, que miden los satélites, no es una extensión del campo magnético terrestre sino un campo interplanetario; la región entre los 10 y los 14 Rt es una zona de turbulencia. La explicación de estos datos, que al principio se buscó en la existencia de un tercer anillo, semejante a los de Van Allen, se encontró finalmente al admitir la idea de Parker de la existencia del «viento solar»: del sol fluye constantemente un flujo de partículas que, al llegar cerca de la Tierra con velocidad supersónica, chocan con el campo magnético terrestre y lo confinan a unos 10 Rt en dirección del Sol (magnetopausa) mientras que la región entre los 10 y los 14 Rt es la zona de turbulencia entre la magnetopausa y la onda de choque producida por el flujo supersónico.

Para intentar resumir brevemente lo que estos dos hechos han representado en el magnetismo terrestre, quizás, lo que mejor puedo hacer es explicar en breves palabras la concepción general que se tenía en los años 1950 y ver cómo se han modificado alrededor del 1960.

MAGNETISMO ANTES DEL AGI

Hasta el Año Geofísico Internacional se concebía el campo magnético terrestre equiparable fundamentalmente al que produciría un dipolo situado aproximadamente en el centro de la Tierra; este campo del dipolo se completaba con el efecto magnético que producían los otros términos del análisis armónico esférico, de los cuales el dipolo era el primero y más importante. Este campo tiene a lo largo de los años una variación secular que hace que los valores del campo en la superficie de la Tierra varíen de forma lenta y continuada. El origen del campo interno se explica por corrientes eléctricas engendradas en el interior de la Tierra por la rotación diferencial del núcleo y de las capas superiores; no se conoce, realmente, la causa de la Variación Secular.

El campo magnético es un campo newtoniano que se entiende fuera de la Tierra, con simetría axial, y la acción que ejerce sobre masas magnéticas exteriores disminuye proporcionalmente al cubo de la distancia al dipolo. Superpuesto a este campo magnético interno, existen variaciones provenientes del exterior de las cuales unas son regulares, como la variación diurna y la estacional, debidas fundamentalmente a la geometría del sistema Sol-Tierra y como la variación lunar, debida a las mareas lunares. Estas variaciones se representan por unos sistemas de corrientes en la alta atmósfera, que fijan con relación al Sol, son cortadas por las líneas del campo magnético en su rotación diurna y anual y producen las variaciones del campo magnético observadas.

En el ecuador se ha notado que la variación diurna está muy amplificada y ese aumento se atribuye a una corriente de chorro, el «electro-jet ecuatorial», que fluye a lo largo del ecuador. Existen otras variaciones irregulares o perturbaciones: unas de ellas duran varios días (las tempestades magnéticas) y o bien se presentan gradualmente y en general están formadas por grandes ondas, y tienden a recurrir cada 27 días con el período de rotación del Sol, o tienen un comienzo brusco seguido de un aumento de la componente horizontal magnética durante un corto período de tiempo, al que le sigue una fuerte disminución del valor de esta componente, hasta que llegado al mínimo, después de varias horas, se recupera lentamente durante varios días; estas tempestades no presentan tan claro como las anteriores, la recurrencia de 27 días. Estas tempestades magnéticas se han intentado explicar por la llegada de chorros de partículas emitidas por el Sol y que producen en la muy alta atmósfera una corriente anular, la «corriente de anillo»; con esta teoría se podía explicar la primera fase de la tempestad, pero no la segunda (descenso) ni la tercera (recuperación).

Otras variaciones se presentan con mucha frecuencia y por su forma se las denomina «bahías»; su explicación se buscaba en sistemas de corrientes en la alta atmósfera o por efectos magnéticos producidos por una corriente de chorro que fluía en las proximidades de la zona auroral: el «electro-jet polar».

De duración más corta son los efectos de las fulguraciones cromosféricas solares: su efecto se cree producido por una ionización extraordinaria, causada por la llegada a la Tierra de una extraordinaria emisión de luz ultra-violeta; a su vez esta ionización produce un sistema de corrientes que causan el aumento de la variación diurna por espacio de tiempo generalmente inferior a una hora.

Finalmente, se conocía la existencia de pulsaciones, vibraciones del campo magnético, con períodos de segundos a minutos cuya causa se ignoraba.

Por lo que refiere a la alta atmósfera, se había adelantado en el conocimiento de la ionosfera, de su composición y dinámica y en ella

se habían colocado las hipotéticas corrientes cuyos efectos magnéticos eran las variaciones externas, pero se desconocía el agente o agentes que podían producir estas corrientes.

MAGNETISMO POST AGI

Los dos descubrimientos hechos por los primeros satélites revolucionaron a fondo el magnetismo: la existencia de los anillos de Van Allen obligó a que en el futuro ya no se pueda considerar el campo magnético como una entidad aislada; ya no se trata de imaginar la Tierra con una serie de líneas de fuerza que unen ambos polos y se van alejando más y más siendo cada vez más débiles; junto a estas líneas de fuerza existe un plasma íntimamente unido al campo magnético, en buena parte gobernado por el mismo, cuyos movimientos son influenciados por el campo magnético y que al moverse ordenadamente producen campos y corrientes eléctricas que a su vez modifican el campo magnético original. La introducción del plasma, su composición y movimientos en los estudios de magnetismo ha abierto enormes horizontes y al mismo tiempo ha complicado enormemente las cosas porque añade a los problemas generales de la física estadística, al tratar de fluidos, las dificultades inherentes a la misma condición del plasma, fluido muy enrarecido, y las derivadas de la necesaria introducción en las fórmulas de los campos magnéticos y eléctricos, a los que están sujetos, y que ellos mismos crean.

El descubrimiento del confinamiento del campo magnético por el viento solar, ha hecho estudiar de modo muy especial los procesos de interacción y, si ha complicado las fórmulas, ha abierto ventanas por las que se pueden vislumbrar las causas de muchos fenómenos magnéticos, aunque queda muchísimo camino por recorrer; en especial ha permitido tener una idea más clara del nexo Sol-Tierra dándose ahora tanta o más importancia a la aportación magnética del Sol, por medio de la llegada de partículas, que a la que se daba antes a la producida por la llegada de la radiación luminica o térmica.

Los conocimientos sobre la composición de la atmósfera y sus propiedades ha permitido formarnos una idea de los procesos que en ella tienen asiento y ha hecho ver que su estructura permite, en algunas capas, la producción de aquellas corrientes que antes se postulaban como método práctico para describir las variaciones magnéticas.

Es evidentemente imposible el intentar describir en breves palabras todo lo que se ha adelantado en estos últimos años y mucho menos intentar formulaciones matemáticas, que ciertamente estarían aquí fuera de lugar. Voy a intentar únicamente insinuar cómo se han ido formulando las nuevas teorías e indicar algunas de las soluciones que ellas aportan a los problemas planteados.

ANILLOS DE VAN ALLEN

Empecemos pues por los anillos de Van Allen y el plasma: La concepción existente era la de una atmósfera más o menos homogénea que naturalmente tenía en sus capas bajas los elementos más pesados y en altura los más ligeros; en la atmósfera alta, al llegar hacia los 80 km predominaban ya los átomos disociados y, por tanto, eléctricamente cargados; después de llegar a un máximo de densidad iónica, alrededor de los 300 km, ésta disminuía asintóticamente, desvaneciéndose hacia el infinito.

Con estas ideas no es de extrañar que los primeros datos de los satélites midiendo densidades muy altas de partículas en regiones en las que se creía que debía haber muy pocas, se atribuyeran a errores de los aparatos. Fue Van Allen, como ya hemos dicho, quien tuvo la idea de que no era equivocación de los aparatos, sino interpretación errónea de las teorías; en efecto, la atmósfera no es un conjunto de capas concéntricas más o menos uniformes, con densidades ordenadas en altura, ya que la presencia del campo magnético modifica sustancialmente esta distribución con simetría esférica.

Para ello le bastó recurrir a los estudios anteriores de Birkeland, Störmer, Alfén y otros sobre el movimiento de las partículas eléctricas en un campo magnético y aplicarlas a los datos de los satélites. A grandes rasgos una partícula eléctrica que tiene una determinada velocidad lineal, convierte su trayectoria en circular al caer bajo la influencia de un campo magnético, en determinadas condiciones, evidentemente, de masa y carga eléctrica de la partícula, de su velocidad lineal y de la intensidad y configuración del campo magnético. Para simplificar las ideas supongamos una partícula cargada, que reúna las condiciones requeridas, que se mueve libremente en el espacio vacío, con una velocidad uniforme, si no hay fuerzas que le impidan continuar con su velocidad lineal; pero supongamos ahora que en este espacio vacío hay únicamente un campo magnético, una línea de fuerza definida por el potencial magnético del dipolo terrestre más o menos perpendicular a la trayectoria de la partícula: el movimiento de la partícula, a pesar de efectuarse en un espacio vacío, ya no será rectilíneo, sino que describirá un círculo alrededor de la línea de fuerza, con un radio muy pequeño que dependerá, entre otras cosas, de la componente de su velocidad perpendicular a la dirección del campo magnético; además de este giro, se trasladará a lo largo de la línea del campo con una velocidad proporcional a la componente de su velocidad paralela a la línea del campo; el movimiento de la partícula se ha convertido en un movimiento helicoidal a lo largo de la línea de fuerza y ésta, que hasta la aparición de la partícula, era poco más que una entelequia matemática, queda físicamente representada en el espacio por la trayectoria de la

partícula; como que el radio de giro es muy pequeño, podemos asimilar la línea de fuerza con el desplazamiento de la partícula a lo largo del eje del giro. Si en vez de una partícula existiese un conjunto de partículas que llegase uniformemente a la línea de fuerza considerada, ésta quedaría físicamente trazada en el espacio por el flujo de las partículas a lo largo de la misma.

Si la intensidad del campo magnético a lo largo de la línea de fuerza fuera constante, en dirección e intensidad, también lo sería el movimiento helicoidal de la partícula o el rectilíneo de su centro de giro; pero aquí tratamos de partículas, que provenientes del espacio exterior, llegan a caer bajo la acción del campo magnético terrestre y en este campo las líneas de fuerza parten del polo Sur verticalmente y van a buscar el polo Norte, al que entran verticalmente y por tanto en su recorrido, a lo largo de un meridiano, tienen que cambiar de dirección; pero además también varía la intensidad del campo ya que ésta depende de la distancia al dipolo y es la máxima en el ecuador, en donde, por tanto, para cada línea de fuerza, el campo tiene su valor mínimo. La variación de la intensidad del campo y la curvatura del mismo hace que el movimiento helicoidal uniforme que tenía la partícula quede modificado de tal manera que la partícula, al alejarse del ecuador a lo largo de la línea de fuerza, disminuye su radio de giro y su velocidad lineal, de forma que al llegar a un cierto punto de su trayectoria, su velocidad lineal se anula y su paso de hélice es también nulo; este punto se llama «punto espejo», ya que al llegar a él, las partículas invierten el sentido de su velocidad lineal, que irá creciendo de nuevo hasta llegar al ecuador, disminuirá al continuar en su marcha hacia el otro polo y al llegar al «punto espejo» situado en el punto conjugado, se reflejará de nuevo y continuará su movimiento de vaivén a lo largo de su línea de fuerza: la partícula pues que originariamente se movía linealmente de modo más o menos perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnéticas, queda atrapada por este campo y circula regularmente a lo largo de su línea de fuerza entre dos puntos espejo situados en ambos hemisferios. Estos puntos espejo son independientes de la masa, carga y velocidad de la partícula y su latitud en el plano meridiano depende únicamente del ángulo de incidencia que forma la velocidad lineal inicial de la partícula con la dirección del campo magnético en el punto de incidencia de la partícula con la línea de fuerza. Si este ángulo de incidencia es demasiado grande en el punto en que la partícula entra en la acción del campo magnético, el «punto espejo» puede estar en la superficie de la Tierra y entonces la partícula no seguirá, naturalmente, el proceso descrito ya que al chocar con los átomos neutros se precipitará; incluso si el punto espejo está dentro de las altas capas atmosféricas, las colisiones con las partículas de la misma harán que se precipite y dé lugar a fenómenos de corrientes eléctricas en las

cercanías de los polos, que es por donde, en dirección casi vertical, las líneas de fuerza penetran en la Tierra. Ya se vislumbra con ello que por aquí se puede buscar una explicación de las auroras polares y de la existencia de las zonas aurorales que separan los casquetes polares del resto del Globo; esta precipitación de partículas, si no se hace uniformemente a lo largo de toda una zona en longitud, puede dar lugar a la creación de campos eléctricos que induzcan a través de corrientes zonales (los electro-jets polares), modificaciones del campo magnético observado en las estaciones magnéticas.

Pero además de este movimiento, las partículas atrapadas en su línea de fuerza, en presencia de otras fuerzas o campos no magnéticos, y aún en su ausencia, por el mismo gradiente existente a lo largo de la línea de fuerza y por la curvatura de las mismas, tienen un tercer movimiento perpendicular a la dirección de las líneas de fuerza y con trayectorias paralelas al ecuador; este movimiento, más lento que los anteriores hace, siempre que se cumplan las condiciones físicas requeridas, que las partículas vayan deslizándose también alrededor de la Tierra, pasando de la línea de fuerza que las atrapó a las líneas de fuerza próximas situadas a la misma distancia de la Tierra; con el tiempo llegan a dar la vuelta entera a la Tierra. Este movimiento es mucho más lento que el movimiento a lo largo de las líneas de fuerza; por ejemplo, un protón con energía de 100 KeV, atrapado por una línea de fuerza distante unos 4 radios terrestres en el plano ecuatorial, necesita unos 15 segundos para recorrer el camino entre los «puntos espejo» y tarda unas dos horas para completar su giro alrededor de la Tierra. En este movimiento protones y electrones, por causa de sus cargas eléctricas, giran alrededor de la Tierra en sentidos opuestos, pero también por sus cargas opuestas, producen como una corriente eléctrica que rodea la Tierra. El resultado neto de estos movimientos es que la Tierra se encuentra como arropada por sucesivas capas de partículas eléctricas cargadas, que giran a su alrededor y que las podemos suponer en una primera aproximación, en condiciones no perturbadas, como uniformemente repartidas; pero no hay que pensar que estas capas son concéntricas con la Tierra, porque las líneas de fuerza del campo magnético no lo son, ya que confluyen todas en el dipolo centrado; además hemos visto que existen los puntos espejo más allá de los cuales, no puede haber partículas atrapadas; teniendo en cuenta esta geometría del campo magnético se puede ver que las partículas atrapadas giran alrededor de la Tierra formando una especie de doble corona o toro alrededor del ecuador, que si la cortamos por un plano meridiano, presenta una forma como de luna creciente el exterior y de riñón el interior, con sus concavidades vueltas hacia la Tierra. Ya en trabajos de 1960, poco más de dos años después del lanzamiento de los primeros satélites artificiales, quedó claro que aparecían dos zonas con alta den-

sidad de partículas: una zona interior que, en el plano ecuatorial, se extiende entre una distancia de unos 600 km a unos 6.000 km, y una exterior, entre los 3 y 10 Rt terrestres. La zona interior está poblada por partículas de alta energía, protones con energías de 10^8 eV y la exterior, por electrones de menor energía de 10^5 a 10^6 eV. El origen de estas partículas ha sido y es todavía discutido, aunque se cree que en gran parte provienen del Sol.

La existencia de estos anillos, con el giro de sus partículas alrededor de la Tierra, ya hemos dicho que produce el efecto de una corriente eléctrica alrededor del ecuador. Esta corriente circular alrededor del plano del ecuador produce naturalmente un campo magnético dirigido hacia el Sur y que por tanto se opone al campo magnético interno de la Tierra; es la corriente responsable de la disminución del campo magnético en la Tierra en los períodos más o menos perturbados.

LA MAGNETOSFERA

Aún con los anillos de Van Allen, el campo magnético terrestre presentaba una simetría alrededor del eje magnético que une los polos y sus líneas de fuerza más exteriores, se suponía se extendían hasta el infinito. Los datos del Pioner I en 1958 y los de satélites posteriores han obligado a admitir que el campo magnético de la Tierra no se extiende hasta el infinito sino que queda delimitado, en dirección al Sol, a unos 10 Rt y que en dirección opuesta, presenta una forma alargada como la cola de un cometa, o la estela de un barco.

Entre estos satélites citemos el Vanguard III, lanzado el 18 de septiembre de 1959, que equipado con magnetómetro de protones, mide el campo magnético próximo a la tierra hasta 1,5 Rt y las mediciones llevan a la conclusión que a esta baja altura, todo sucede como si el campo fuera prácticamente newtoniano. El 11 de marzo de 1960 se lanza el Pioner V en órbita solar, que mide campos magnéticos (perpendiculares al «spin» del satélite) y halla que entre 5 y 9 Rt el campo decrece como si fuera newtoniano, pero a mayores distancias el campo es muy pequeño, uniforme y casi perpendicular al plano de la elíptica. Importante fue el Explorer X, lanzado el 21 de marzo de 1961 hacia el hemisferio oscuro: no llega a encontrar el campo débil a grandes distancias, pero halla la zona de turbulencia, que los satélites con órbita en el hemisferio iluminado, encuentra entre los 10 y los 14 Rt.

Con ello se llega a una configuración asimétrica del campo magnético terrestre: en dirección al sol aparecen dos superficies de discontinuidad: una hacia los 10 Rt, la «magnetopausa» y otra hacia los 14 Rt la «onda del choque», y por tanto tenemos tres regiones: la pri-

mera, a menos de 10 Rt, la «magnetosfera» que en líneas generales es newtoniana; la segunda, de 10 a 14 Rt es al zona de turbulencia y la tercera, más allá de los 14 Rt en la que no hay campo magnético terrestre y el campo débil que se mide (unas 2.5 a 5 nT) es un campo interplanetario.

Por la parte de la Tierra opuesta al Sol se forma la llamada «cola» hasta grandes extensiones como lo demuestran los datos del Explorer 33 (lanzado el 1 de julio de 1966) que la observan más allá de la órbita lunar, o el Explorer 35 (19 de julio de 1967) que la detecta a 60 Rt; parece que los Pioner 8 y 9 vieron la cola a distancia de unos 500 Rt. Satélites muy posteriores la han encontrado hasta enormes distancias de la Tierra.

Esta configuración se explica suponiendo que el Sol emite constantemente un flujo de partículas, que en su viaje por el espacio, chocan con la Tierra; es lo que se ha llamado «Viento Solar». Si admitimos que el «viento solar» está formado por un plasma unidireccional, homogéneo, completamente ionizado y con un campo magnético débil, resulta que este campo magnético queda congelado en el plasma y produce como un choque al encontrarse con el campo magnético terrestre, también él con su plasma. El resultado es una configuración semejante a la que hemos intentado describir: para formarnos una idea podemos imaginar el viento solar como la corriente de un río, y que esta corriente halla a su paso a una esfera sólida, envuelta toda ella por una capa fluida pero muy viscosamente adherida a ella (el plasma de la atmósfera terrestre, sujeto a ella por su campo magnético). El resultado del choque del flujo solar con la Tierra será una compresión de la capa viscosa en la dirección del flujo; este se desviará alrededor del obstáculo y en su movimiento arrastrará río abajo parte de la superficie viscosa, que se extenderá en forma de cola; como que la velocidad del viento solar es supersónica, la onda de choque se forma a varios radios de la esfera obstáculo, como se sabe por la mecánica de los fluidos.

Naturalmente todo este proceso se hace por la interacción del plasma solar y del terrestre, ambos congelados en sus campos magnéticos, lo cual exige una reorganización de los plasmas, y engendra a su vez, campos eléctricos y por consiguiente corrientes eléctricas en las superficies de contacto: estas corrientes, por su parte, producen campos magnéticos y cuando estos campos magnéticos anulen los existentes primitivamente en las superficies de contacto, se habrá llegado al equilibrio y habrá quedado configurada la cavidad magnetosférica alrededor de la Tierra y podremos decir que ella delimita la atmósfera terrestre ya que sus partículas, en el interior de la cavidad, están regidas por la gravedad y el campo magnético terrestre y fuera de ella, lo que existe es el plasma interplanetario.

EL VIENTO SOLAR

La idea del viento solar no es completamente nueva, pues ya hemos visto que la existencia de las auroras y de la influencia del Sol en varias manifestaciones del campo magnético terrestre exigían la llegada a la Tierra de la energía solar no sólo en forma de radiación sino también de partículas. Pero, en general, se admitía que este flujo de partículas ocurría ocasionalmente durante las auroras y las grandes tempestades magnéticas; la noción de viento solar es algo más permanentemente. Ya en 1951 y 1952, Bierman, por observaciones de las colas cometarias, había deducido que en el espacio interplanetario debía haber continuamente una radiación corpuscular y Chapman, en 1957, había sugerido que la corona solar, no sólo se extendía a unos cuantos radios solares, sino que había que considerar todo el sistema solar sumergido en ella. Pero la idea era todavía la de una corona solar estática.

El paso de una corona estática a una corona dinámica la dio Parker en 1958 y otra explicación fue dada en 1960 por Chamberlain; ambas teorías conducen prácticamente a los mismos resultados pero hoy día se acepta generalmente la teoría de Parker. Daremos pues una breve idea de la misma, aunque, naturalmente, prescindiremos de su formulación matemática.

Parker supuso que en la corona solar, cerca del Sol, las partículas tienen un recorrido pequeño y que a grandes distancias, por la mayor expansión, el recorrido es grande; de todas formas el campo magnético hace que las interacciones sean fuertes y, por tanto, se puede considerar el conjunto como un fluido al que se pueden aplicar las leyes conocidas de la hidrodinámica; en resumen el viento solar no es más que el resultado de una expansión hidrodinámica de la corona.

Partiendo de las ecuaciones de la conservación de masa y de conservación de momentos, se llega fácilmente a una relación entre presión, densidad y velocidad del viento solar a una distancia cualquiera del Sol, con la gravedad en el Sol y su masa. Si en esta relación introducimos la fórmula que relaciona en los gases la velocidad del sonido con las variaciones de presión y densidad, se puede demostrar que si admitimos que la velocidad del gas aumenta constantemente al alejarse del Sol y empieza con una velocidad subsónica, al llegar a una distancia determinada del Sol, llamado punto crítico, la velocidad pasa a ser supersónica. Este punto crítico, en el caso del hidrógeno (el mayor constituyente de la corona solar), en el supuesto de que haya equilibrio térmico entre protones y electrones y admitiendo una temperatura de la corona de unos 2×10^6 grados Kelvin y siendo el radio del Sol de unos 7×10^8 m, se encuentra a unos 1.7 radios solares; las fórmulas nos dan también la máxima temperatura de la corona solar que permite una expansión que pueda llegar a dar velocidades supersónicas; ésta

es aproximadamente de unos 4×10 grados Kelvin; la corona, con esta o mayor temperatura en su base, daría lugar a una expansión que no llegaría a rebasar la velocidad del sonido; como que la corona solar tiene una temperatura aproximadamente la mitad de la temperatura crítica señalada, se sigue que la expansión llega a ser supersónica, y con ésta llega hasta la Tierra.

Para poder resolver las ecuaciones de forma que nos den los tres elementos de velocidad, densidad y presión o temperatura, se necesita una tercera ecuación, ya que hemos partido únicamente de las dos de conservación de la masa y de los momentos. La tercera ecuación que necesitamos nos la daría la ecuación de estado, si la conociéramos. Con todo podemos hacer algunas hipótesis que nos acerquen a la resolución del problema: en primer lugar podemos suponer que la expansión es isotérmica en una región cercana a la base de la corona, siendo el mismo Sol el que aporta el calor necesario; a partir de un cierto punto la expansión ha de ser adiabática. Otra hipótesis es suponer en todo el proceso de expansión un término medio entre isoterma y adiabático, lo cual se puede hacer introduciendo en la ecuación de Poisson, que relaciona temperatura y presión en los gases con los calores específicos a presión y a volumen constante, un nuevo término (físicamente un calor específico) que puede tomar todos los valores de $+\infty$ a $-\infty$.

Con estas hipótesis se puede integrar el sistema de ecuaciones, entre la base de la corona y un punto cualquiera fuera de la misma, pero nos encontramos con que la integración queda sujeta al valor inicial de la velocidad en la base de la corona; y este valor no sólo no lo conocemos, sino que además está condicionado por el valor que tiene la velocidad en el punto crítico. A base de una serie de consideraciones se ha podido relacionar esta velocidad inicial con la temperatura en la base de la corona y el resultado final es que la velocidad del viento solar aumenta rápidamente al principio, y que al llegar a la órbita de la Tierra tiene una velocidad de unos cientos de kilómetros por segundo, como los que en realidad se han observado por diversos satélites y que son perfectamente compatibles con las temperaturas observadas. Del valor de la velocidad se pasa al de la densidad a base de los datos que da la astronomía solar para la baja corona.

La dirección del viento solar es radial desde un sistema de referencia fijo en el sol, pero forma una espiral de Arquímedes desde un sistema de referencia fijo en la Tierra. Su dirección calculada, concuerda con la observada por los satélites.

La teoría hidrodinámica ha logrado explicar satisfactoriamente las observaciones sobre velocidad, dirección, densidad y temperatura del viento solar, pero falta explicar otro elemento fundamental: su campo magnético. Para ello hay que usar las fórmulas que nos da la magneto-

hidrodinámica. Estas fórmulas se complican, ahora, extraordinariamente y nos es imposible seguir paso a paso su deducción; pero sí podremos indicar, aunque sea sumariamente, algunas de las hipótesis simplificadoras que se introducen, para tener alguna idea de la confianza que se pueda tener en los resultados a los que se llega.

En primera lugar se supone, como ya hemos hecho hasta ahora, que el fluido se comporta como un fluido perfecto, y además que su viscosidad es despreciable; esta condición es admisible en nuestro caso ya que la supresión del término correspondiente a la viscosidad se puede efectuar cuando el número de Reynolds ordinario es mucho mayor que la unidad; este número es el cociente entre el producto de la velocidad por la longitud característica y la viscosidad dinámica; en nuestro caso la velocidad de las partículas es grande y dado lo enraizado que está el plasma, la longitud característica también lo es, con lo cual el número de Reynolds queda siempre muy por encima de la unidad.

Otra suposición es que la tensión se reduce a un vector y aún a un escalar: la razón está en que la aparición de la presión como un tensor es debida a la anisotropía causada por las fuerzas viscosas y acabamos de considerarlas nulas.

Otras condiciones nos pueden simplificar las leyes de Maxwell, que relacionan campos magnéticos y eléctricos, y que ahora debemos introducir: primeramente se supone que en el plasma la conductividad es muy grande, con lo cual pueden despreciarse las corrientes de desplazamiento. Otra simplificación consiste en admitir que en el plasma se conserva la neutralidad eléctrica, es decir que, a escala global del plasma, no hay carga eléctrica o dicho de otra manera, que cuando, por alguna causa, se separan en el plasma los protones y los electrones, se crea un campo estacionario que en un instante redistribuye las cargas a su estado primitivo. También en el plasma solar se puede aplicar esta simplificación ya que, a causa de la pequeña densidad del plasma, el radio del espacio libre que tienen las partículas es muy superior a la llamada longitud de Debye. Finalmente aún se puede hacer en el espacio otra simplificación que consiste en suprimir el término que incluye la conductividad eléctrica, ya que el número magnético de Reynolds es en el espacio mucho mayor que la unidad.

Con todo ello se llega a la fórmula básica que nos dice que la variación del campo magnético con el tiempo es igual al rotacional del producto vectorial de la velocidad por el campo magnético. Esta relación, con su expresión matemática tan abstracta, representa un proceso físico muy concreto, en las condiciones que hemos expuesto: las líneas de fuerza, o dicho brevemente, el campo magnético se mueve con, e igual que, el plasma; es lo que llamamos un campo magnético congelado en el plasma.

La noción del campo magnético congelado en el plasma nos permite calcular en qué dirección este campo magnético llegará a la órbita de la tierra, admitiendo que en ciertos puntos del Sol el campo magnético es radial y paralelo a la velocidad radial de las partículas emitidas por el Sol. Como que la inclinación del eje solar sobre la eclíptica es de $7^{\circ} 15'$ hemos de admitir que el flujo que llega a la Tierra proviene de la zona ecuatorial del Sol y por tanto hemos de tomar la velocidad de rotación de esta zona para calcular el ángulo con que el flujo solar y el campo magnético congelado llegará a la órbita de la Tierra, ya que su trayectoria en el espacio queda evidentemente modificada por el giro del Sol. Teniendo en cuenta que la velocidad angular de rotación del plasma con el Sol no es constante (y que se comporta asintóticamente como la inversa del cuadrado de la distancia) se llega a calcular un ángulo de llegada a la Tierra respecto a la línea Sol-Tierra de unos 50° .

La intensidad del campo magnético solar al llegar a la Tierra, que se encuentra situada a una distancia del Sol de unos 215 radios solares, sería, según la teoría del potencial de Newton de una centésima de nT, partiendo de la base que el campo magnético creado por el dipolo solar es, en su superficie, de 10 Teslas, como se ha podido medir en los trabajos de física solar; de hecho el campo magnético medido por los satélites artificiales es unas 500 veces mayor. La explicación nos la da, de nuevo, la idea del campo magnético congelado y por tanto arrastrado por el plasma hasta la órbita de la Tierra; este hecho nos permite calcular el valor del campo en función del campo magnético solar, distancia Sol-Tierra, rotación solar y velocidad de las partículas al llegar a la órbita de la Tierra: el cálculo nos da un campo magnético de unas 5 nT, que es el observado y que no es el causado por el campo newtoniano, sino el arrastrado por el viento solar. De todas formas este valor es bastante sensible a la velocidad del viento solar.

Los otros parámetros del viento solar, se han podido calcular, como hemos insinuado antes, y son aproximadamente los observados por los satélites:

Velocidad: unos 300 km/s en periodos normales, pero que puede llegar a 800 y más km/s en periodos perturbados.

Temperatura: es anisotrópica y su distribución no es la de Maxwell; con todo parece ser que se puede afirmar que tomada a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, es mayor que tomada perpendicular a ella; está además relacionada con la velocidad del viento solar siendo menor cuando la velocidad es menor. Con los primeros satélites que la midieron se encontraron temperaturas que iban de seis mil a un millón de grados Kelvin y su promedio se fijó en unos 2×10^5 grados, aunque con grandes fluctuaciones.

Densidad: se hallaron densidades muy dispares pero puede considerarse una densidad media de unas 5 partículas por cm; esta densidad aumenta durante los periodos agitados y especialmente durante las tempestades magnéticas.

Composición: fundamentalmente protones, pero hay también partículas alfa e incluso algunos átomos de Helio ionizados.

Dirección del campo magnético: Como hemos indicado, toma la dirección de la velocidad por estar congelado en el plasma y por tanto aparece con la forma de la espiral de Arquímedes. Pero hemos de indicar que el sentido varia de tal manera que unas veces tiene el sentido positivo Sol-Tierra y en otros negativo de la Tierra al Sol. La razón de esta diferencia reside en el hecho de que las líneas de fuerza del campo magnético solar, las cuales determinan el ecuador magnético, salen del Sol en un hemisferio y vuelven al mismo en el otro hemisferio; pero el plano ecuatorial magnético, que ellas definen, no es paralelo al plano de la eclíptica sino que presenta fluctuaciones respecto al ecuador solar geográfico, si se puede usar esta expresión; de manera que durante una rotación sinódica solar, la órbita de la Tierra unas veces se sitúa por encima del ecuador solar y en otras por debajo: naturalmente, en estos casos se verán líneas de fuerza del campo magnético solar dirigidas hacia el Sol o que provienen del mismo. Esto hace que en la espiral de Arquímedes se distingan sectores distintos, según sea en ellas el sentido del campo magnético positivo o negativo.

INTERACCIÓN SOL-TIERRA

Con toda esta descripción del campo magnético de la Tierra y del viento solar ya tenemos, por decirlo así, los dos antagonistas que chocan en el espacio y se trata ahora de ver cómo queda la configuración del campo magnético terrestre a consecuencia de la interacción con el del viento solar.

Las ecuaciones de la magnetohidrodinámica nos ofrecen de nuevo el principio de solución con la introducción del concepto de presión magnética cuyo valor viene dado por el cociente del cuadrado de la intensidad del campo magnético por 8π .

Consideremos ahora la perturbación que causa en el campo magnético terrestre la presencia del viento solar: si no hubiera viento solar el campo magnético se extendería hasta el infinito decreciendo su valor con el cubo de la distancia y por tanto la presión magnética que acabamos de mencionar decrecerá con la sexta potencia de la distancia. Es evidente, por tanto que el viento solar, que ejerce sobre un obstáculo una presión debida a su velocidad y densidad, pero siempre finita, se encontrará con un punto (o mejor con una superficie) en el espacio en

que sea igualada por la presión magnética del campo terrestre extendido hasta este punto. En este punto o superficie quedarán enfrentadas y equilibradas ambas presiones. Ahora bien en la parte del viento solar, predomina la presión inercial sobre la magnética (que en el viento solar cerca de la Tierra es muy pequeña) y de parte de la Tierra la que predomina es la presión magnética. Por tanto podemos suponer que el equilibrio se establece entre esas dos presiones.

Al establecer la ecuación correspondiente a ambas presiones hemos de introducir el ángulo que forma la llegada del viento solar con la dirección Sol-Tierra y hemos de expresar las componentes del campo magnético de la Tierra en función de sus coordenadas, longitud, latitud y distancia al centro, para poder tener la configuración en el espacio que tomarán los puntos en los que las dos presiones mencionadas se anularán. Para llegar a fórmulas más asequibles, Beard introdujo una primera simplificación al suponer que el campo magnético terrestre en el interior de la magnetopausa es proporcional únicamente a su componente transversal; esta simplificación es legítima dada la geometría de los conjuntos Sol-Tierra y de sus campos; con ello el eje del campo magnético terrestre resulta perpendicular a la dirección del viento solar, y Davis y Beard, con todo ello, dieron la fórmula que representa los puntos de equilibrio en un sistema de coordenadas polares cuyo origen se sitúa en el centro de la Tierra; su eje polar está alineado en la dirección del dipolo terrestre, θ se mide como colatitud a lo largo de los meridianos y φ se mide a partir de la línea que, pasando por el origen es perpendicular al eje del dipolo terrestre y a la dirección Sol-Tierra, de tal forma que el punto subsolar equivalga a $\varphi=90^\circ$. La ecuación resultante se puede integrar en el plano ecuatorial y en el del primer meridiano; para los demás planos se puede integrar numéricamente.

En la parte iluminada por el Sol, que es en la que se verifica el choque, se obtienen los siguientes resultados: en el entorno del punto subsolar las curvas son casi circulares mientras que al alejarnos de éste se abren aumentando el radio de curvatura. En dirección al Sol, la distancia de la Tierra al punto de equilibrio, se encuentra, en condiciones normales, a unos 10 Rt. Estos cálculos dan resultados perfectamente comparables con los datos suministrados por los satélites que encuentran, en condiciones normales, la magnetopausa aproximadamente en el punto indicado y que tiene forma casi circular en el entorno del punto subsolar pero que se va abriendo en las regiones correspondientes a los crepúsculos, es decir, al avanzar hacia los 90° ; por ejemplo, el Explorer 12 (16 agosto de 1961) con un apogeo que fue corriéndose de 0° a 100° respecto a la línea Sol-Tierra, al principio, cuando el ángulo era pequeño, sus datos sobre la posición de la magnetopausa, indicaban una forma circular, pero a medida que el ángulo aumentaba, cuando se acercaba al crepúsculo matutino, en algunos pasos no llegó a encon-

trar la magnetopausa, a pesar de que su distancia a la Tierra era de unos 13 Rt; de igual forma el Explorer 14 (3 octubre 1963) demostró que en la misma región la magnetopausa puede quedar situada más allá de los 16 Rt.

En el plano meridiano hemos de hacer notar la existencia de un punto singular o punto neutro; ésta es debida a que hemos supuesto que la presión dinámica del viento solar se equilibraba con la componente tangencial del campo magnético, pero ésta es nula en la línea de los polos y por tanto a lo largo de esta línea la magnetopausa ha de ser paralela a la dirección del viento solar. Este punto es muy importante en la física de la magnetosfera, porque indica que alrededor de los polos magnéticos de la Tierra y siguiendo la dirección de sus líneas de fuerza se forma como un embudo, por el cual las partículas del viento solar pueden penetrar en la cavidad magnetofísica y precipitarse directamente hacia los casquetes polares o tomar parte activa en los complejos fenómenos que suceden en ellos, como por ejemplo, en las tempestades magnéticas.

Naturalmente la descripción no es completa, todavía, porque las fórmulas nos han permitido encontrar la forma de la magnetopausa en la parte de la Tierra iluminada por el Sol, que es la parte en que se verifica el choque, pero no nos dice nada sobre la forma de la misma en la parte que podríamos llamar noche. Las ideas han ido cambiando y si bien al principio se creía que la cola se extendía a gran distancia, se suponía que se cerraba a una distancia mayor o menor. Hoy, por el contrario, se supone que en la parte noche, se difumina en el espacio sin que las líneas del campo magnético terrestre arrastradas en ella se cierren sobre sí mismas sino que llegan a tomar una configuración prácticamente paralela al plano de la eclíptica.

PLASMA Y CORRIENTES ELÉCTRICAS

De esta configuración casi geométrica de la magnetosfera tenemos que pasar a una noción más física de la misma, para lo cual se han ido introduciendo cada vez más refinamientos a medida que se han ido conociendo nuevos datos; en general, lo que se ha ido estudiando ha sido la distribución de las partículas del plasma, la creación consiguiente de campos eléctricos y su repercusión en el campo magnético terrestre. Por ejemplo, las teorías nos ha dicho que en la magnetopausa la presión dinámica del viento solar hace que el campo magnético transversal se anule, ¿Cómo puede lograrse esto físicamente en la parte interior de la magnetosfera?; la respuesta física es creando en ella un campo magnético igual, pero de sentido contrario, al que en aquel punto tendría la componente transversal si no existiese el viento solar y esto

se logra, por ejemplo, en el ecuador, por una corriente que fluya de las zonas del crepúsculo matutino al vespertino. Otro ejemplo lo tenemos en la interacción turbulenta del viento solar con el tenue plasma en la superficie de la magnetosfera; esta interacción induce una separación de cargas a lo largo de toda la magnetopausa, que configuran el llamado manto y la separación de carga produce un campo eléctrico que genera en el manto una corriente eléctrica que cancela la acción del campo magnético terrestre en este manto y permite al viento solar fluir libremente a lo largo de la magnetopausa; pero naturalmente este campo eléctrico que se establece con cargas de signo contrario en el hemisferio Norte y Sur, produce, a su vez, otra corriente que fluye también de este a oeste.

A lo largo de la cola las líneas del campo magnético se extienden, hemos dicho, casi paralelas unas a otras, pero, naturalmente, en sentido distinto en ambos hemisferios: unas dirigidas de la cola hacia el polo norte y otras partiendo del polo sur hacia la cola; esta configuración impone la existencia, en el plano del ecuador, de un plano con componente magnética cero en la dirección Sol-Tierra; también en este plano se constituye una región de mayor densidad de plasma y en él los electrones se mueven hacia el crepúsculo matutino, mientras que los protones se mueven hacia el vespertino y el circuito se cierra en el manto. Como que las líneas de fuerza están congeladas en el plasma, podemos considerar que este movimiento del plasma en la cola de la magnetosfera arrastra las líneas de fuerza, de sentido contrario en ambos hemisferios, y las junta al llegar a la capa neutra, en donde se anulan mutuamente.

Hemos de tener en cuenta además la existencia dentro de la magnetosfera de los anillos de Van Allen. Habíamos supuesto que ofrecían simetría radial porque ésta era la simetría del campo geomagnético; ahora, al quedar las líneas de fuerza, comprimidas en la parte iluminada de la Tierra y extendidas en el otro hemisferio, encontramos que los anillos quedan también modificados. En primer lugar, aún admitiendo la simetría radial, nos encontramos que el campo magnético queda como cortado por la magnetopausa, con lo cual líneas de fuerza del campo que llegaban al polo, ahora encuentran en su recorrido el corte producido por la magnetopausa y por tanto sucede que en varias de ellas la llegada a la magnetopausa sucede antes que al punto espejo, con lo cual, las partículas, en su movimiento a lo largo de la línea de fuerza, no encontrarán el punto espejo para reflejarse en él y continuar atrapadas, sino que interaccionarán con las partículas y campo del manto.

Además habíamos llegado al deslizamiento de las partículas en la dirección de los meridianos considerando solamente la curvatura y el gradiente del campo magnético terrestre, pero ahora, al considerar la

compresión de la magnetosfera por el viento solar, hemos establecido una corriente eléctrica en dirección de salida a puesta del Sol y, por tanto, un potencial eléctrico a lo largo de los paralelos terrestres que modifica la velocidad de deslizamiento de las partículas y que, al superponerse a la velocidad de deslizamiento producida por los gradientes del campo magnético, hace que las líneas equipotenciales que siguen las partículas en su deslizamiento, ya no sean círculos concéntricos a la Tierra, sino que toman una forma semejante a huevos, con su parte más alargada dirigida hacia la parte del crepúsculo vespertino.

Por si todo esto fuera poco, existe otro elemento importantísimo en todo este proceso: la existencia de esta cúspide o embudo polar, que hemos mencionado; por él las partículas solares penetran libremente en la magnetosfera terrestre y arrastran el campo magnético, interplanetario; ahora bien, la magnetosfera (partículas y campo magnético) giran prácticamente con la misma velocidad que la Tierra con respecto a la dirección del viento solar; la recombinación del flujo de partículas terrestres y solares y de ambos campos magnéticos, modifican necesariamente el esquema elemental que hemos ido trazando.

APLICACIÓN A LAS TEMPESTADES MAGNÉTICAS

No podemos adentrarnos mucho más en los problemas que se han ido creando con las medidas más complicadas y más exactas que han dado los satélites artificiales; únicamente voy a intentar resumir cómo las ideas que hemos dado abren una vía de inteligencia sobre las tempestades magnéticas. Ya dijimos, que las de comienzo brusco presentan tres partes: aumento brusco de la componente horizontal y alto nivel, que dura unas cuantas horas, descenso fuerte de estos valores hasta valores mucho más bajos que los que tenía antes del comienzo brusco y finalmente una fase de recuperación, que dura varios días, hasta que el valor del campo magnético recobra su valor normal.

Para explicar estos efectos hemos de partir de la base que además del viento solar, que comprime regularmente la magnetosfera, el Sol presenta en sus períodos undecenales de mayor actividad, zonas muy fuertemente perturbadas y que al producirse las erupciones cromosféricas emite chorros extraordinarios de partículas de alta energía; estos chorros refuerzan, naturalmente, la acción del viento solar y al entrar en contacto con la magnetosfera terrestre, producen una mayor presión sobre la magnetopausa y ésta se comprime más, acercándose más a la Tierra; esta aproximación brusca produce el aumento del campo magnético y el alto valor que se observa durante algún tiempo. Pero esta mayor presión hace que entren en la magnetosfera más partículas que las normales, con lo cual la corriente de anillo, que hemos dicho

producen los anillos de Van Allen, se intensifica e inicia la disminución del campo magnético terrestre; al mismo tiempo por la mayor compresión hay más líneas de fuerza que chocan con el manto y por tanto hay menos líneas de fuerza que presentan sus puntos espejos libres para que en ellos se reflejen las partículas, con lo que resulta que hay un aumento de precipitación de partículas aurorales que aumentan la intensidad de los electrojets polares y se produce una serie de tempestades polares elementales que tienden también a disminuir la intensidad del campo. El chorro emitido por el Sol en su región perturbadora, dura poco tiempo, y cesa también el aporte de presión sobre la magnetosfera y ésta vuelve asintóticamente a su estado normal; es la fase de lenta recuperación.

Esta combinación de viento solar estable y chorros de alta energía emitidos por las regiones activas, echan casi por la base, las hipótesis que formulábamos al explicar el viento solar, cuando lo suponíamos radial, isotrópico, etc. Ya se ve que en la realidad el viento solar, en los períodos perturbados, ha de ser turbulento por lo menos en las regiones de contacto entre viento en calma y chorros perturbados y perturbadores; estas turbulencias han de traducirse en efectos magnéticos en el campo terrestre. Se está trabajando en esta dirección pero aún se está lejos de poder diagnosticar por las variaciones magnéticas registradas en los observatorios las condiciones puntuales del viento solar.

Sin embargo estas observaciones han permitido señalar una anomalía que presentaba la teoría del viento solar: si la actividad magnética está relacionada con el viento solar y es mayor en los períodos de mayor actividad del ciclo solar era natural esperar que las mediciones de la velocidad de este viento fueran mayores cuando la actividad solar fuera mayor; en la práctica se han encontrado, en general, mayores velocidades en las épocas de mínima actividad solar. La explicación ha tenido que buscarse en la física solar: en épocas de gran actividad se forman en el Sol los grandes grupos de manchas con campos bipolares que se cierran dentro la corona interior por lóbulos de líneas de fuerza que unen las manchas de polaridad contraria; estos lóbulos dificultan la expansión libre de la corona no perturbada y retrasan la emisión del viento solar; en épocas de mínima actividad solar predominan las regiones unipolares y sus líneas de fuerza abiertas permiten fácilmente la emisión del flujo solar; estas regiones unipolares pueden durar desde algunos días a varios meses y por tanto, la perturbación que ellas producen, podrá observarse recurrentemente en la Tierra con el período de la rotación sinódico del Sol; es lo que en realidad sucede: estas regiones son, en general, las que causan las tempestades de comienzo progresivo y se les ha dado ahora el nombre de «agujeros coronales» y se han identificado con las hipotéticas regiones «M» del Sol postuladas por Bartels. Por el contrario, las tempestades de comienzo brusco

vienen producidas, ya lo hemos dicho, por el chorro emitido en un breve tiempo por las erupciones cromosféricas o por otros mecanismos de eyección de masas solares y ocurren más frecuentemente en épocas de mayor actividad solar; su recurrencia con el período sinódico del Sol no ha de aparecer excepto en los casos, que existen, en que la región solar altamente perturbada, vaya teniendo fulguraciones cromosféricas a lo largo de más de una rotación.

* * *

CONCLUSIÓN

Al querer poner punto final a esta exploración de cómo han ido variando los conocimientos del campo magnético me doy cuenta que no he dicho casi nada de la ionosfera, que limita la magnetosfera en su parte cercana a la Tierra, ni he casi mencionado los procesos energéticos que aceleran las partículas, o los difusivos que las retardan; tampoco he dicho nada de las interacciones entre plasmas ni de las oscilaciones o pulsaciones que estas interacciones inducen en el campo magnético terrestre. Son muchas las cosas que han quedado por explicar, pero creemos, que entre lo dicho y lo insinuado, ha quedado justificado el título que hemos dado a esta disertación: «El Geomagnetismo Ciencia en Progreso».

Permitaseme, antes de terminar, dos breves consideraciones que se me han ocurrido mientras redactaba estas páginas, la primera es de carácter especulativo, la segunda, quizás podría ser de carácter más práctico.

PROGRESO Y MODERACIÓN

La primera conclusión, al pensar en el progreso de la Ciencia, es que esta misma idea de progreso implica una enorme dosis de moderación y podríamos decir de humildad intelectual en el científico: si creemos en el progreso de la Ciencia, tenemos que admitir la frase tantas veces oída en la propaganda comercial «hoy más que ayer y menos que mañana», es decir que tenemos que aceptar que lo que creemos son los grandes logros del día de hoy serán, quizás, las teorías elementales de los progresos futuros; en una ciencia en continuo hacerse, aún las teorías mejor fundadas en las observaciones presentes, podrán y tendrán que ser modificadas por mejores observaciones posteriores y por una mejor interpretación de las mismas. La afirmación de Gilbert que la Declinación es constante para cada punto de la Tierra, es un muy claro ejemplo de ello. Más obvio, todavía, es el paso de la

concepción de una Tierra quieta y de un Sol móvil, al parecer, bien fundada en la experiencia de los sentidos, a la concepción contraria, admitida hoy por todos. Aún otro ejemplo evidente lo tenemos en la concepción del átomo: todavía en mis primeras clases de física se me explicó que el átomo era indivisible, como su mismo nombre indica; cuán lejos estamos hoy de aquella idea y cuánto progreso (y también destrucción) ha causado el conocer y llevar a cabo su fisión y fusión!

Sin embargo este sentimiento de inseguridad que puede producir el saber que los conocimientos que hoy tenemos y los que hoy podemos aportar con nuestro trabajo, serán superados en un futuro más o menos lejano, no tiene que hacernos retroceder en la labor emprendida; precisamente porque hay progreso y porque la naturaleza no obra por saltos, el conocimiento mejor del mañana, ha de fundarse necesariamente en la base sólida del conocimiento de hoy, quizás más imperfecto, pero absolutamente necesario para el paso adelante que la Ciencia dará mañana. Si por temor al futuro dejamos de cimentar hoy los conocimientos presentes, las generaciones futuras no podrán continuar la construcción del edificio que es la Ciencia.

EL GEOMAGNETISMO EN ESPAÑA

La segunda conclusión a la que he llegado, he dudado mucho si debía exponerla aquí en esta Academia; no quisiera que se me tachase de derrotista ni de crítico a ultranza, pero después de bien pensado he creído que sería no confiar en vuestro claro juicio y recta intención, no decirlo, para no exponerme a juicios contrarios. En el largo camino que va desde la piedra imán hasta la concepción de la magnetosfera, no encontramos prácticamente ninguna aportación española. Y lo que a mi modo de ver es todavía más significativo, en la literatura magnética de hoy, las aportaciones científicas españolas en revistas de prestigio internacional son tan escasas que casi no han de ser tenidas en cuenta; y si de artículos de revistas pasamos a libros de geomagnetismo la conclusión es todavía más descorazonadora: Parece como si todavía viviésemos antes del año 1957 (y estamos ya en 1988) cuando el lanzamiento de los primeros satélites produjo la enorme convulsión en los conocimientos del magnetismo terrestre, como hemos intentado explicar; han pasado 30 años y nos encontramos ciertamente atrasados en ésta, como quizás podrá decirse también, en otras ramas de la Ciencia. Al hacer este análisis, no desconozco que desde el Observatorio del Ebro tampoco hemos hecho avances significativos en este campo, por lo cual me toca también parte de la culpa; mis mismas palabras deben haber manifestado la limitación de mis conocimientos en estas materias.

Como que no es cosa de lamentarse estérilmente sino que hay que buscar remedio a estas situaciones hay que intentar encontrar las causas de ellas. No creo, ni mucho menos, que la causa radique en la falta de capacidad de nuestros investigadores, que han dado pruebas más que suficientes, en otros y quizás más difíciles campos, de saber asimilar los avances científicos y de colaborar a los mismos con valiosísimas aportaciones. La causa quizás haya que buscarla en el hecho que no se les haya dirigido hacia estos estudios y aquí sí que quizás podamos encontrar la raíz en el sistema organizativo que tenemos. En mi experiencia personal están mis años universitarios, casi inmediatamente después de nuestra guerra, por tanto, en condiciones no enteramente normales por la carencia de profesores titulares en varias cátedras; pero el hecho es que en la carrera de Físicas, en la Universidad de Barcelona, sólo teníamos un curso de Geofísica, en el que el magnetismo terrestre quedaba relegado a las nociones más elementales; y creo que Barcelona era la única facultad de Ciencias en las que en aquellos años se daba Geofísica. La dotación de la Cátedra de Geofísica en Madrid, fue evidentemente una mejora, pero de hecho la parte de magnetismo terrestre continúa siendo insuficiente.

De todas formas es imposible incluir el magnetismo en una sola asignatura de Geofísica, aunque de ella se haya separado ya la Física de la Atmósfera. Un título de Licenciado en Físicas, significa hoy demasiado poco, porque abarca demasiado. Ya sé que no podemos llegar a especializarnos en temas excesivamente concretos y sacar el título, por ejemplo, en literatura china de la época Ming, como vi hacían en alguna Universidad inglesa; pero sin llegar a estos extremos, es necesario que se puedan diversificar más los estudios y se pueda dedicar más tiempo a materias más restringidas. Se han hecho avances en esta dirección y hoy se pueden cursar asignaturas como física de plasmas, pero aún no es suficiente; en algunos programas preparados para el Tercer Ciclo no supe ver prácticamente nada de magnetismo terrestre. Comprendo que el problema tiene un ámbito reducido pero esto no empece que pueda tener su importancia. En España hemos podido ver cómo la acción de algunas Cátedras con profesores competentes y bien formados en alguna especialidad de la Geofísica, han logrado descubrir numerosos discípulos interesados en ellas y formar un buen grupo de especialistas.

Creo, con todo, que todo el impulso no puede venir únicamente de la Universidad, aunque su aportación es indispensable, porque sin ella no habría futuros investigadores; es necesario también, que se fomente cada vez más la creación de centros de investigación que requieran personas bien formadas en materias bastante puntuales: sé que se han hecho esfuerzos en esta dirección y que en este momento aún se están

haciendo; pero permítaseme indicar que a estos esfuerzos no siempre les ha correspondido el éxito, quizás por varias razones.

Una de ellas puede ser la falta de coordinación de los esfuerzos entre diversas entidades, y no me refiero entre Centros Universitarios y Centros de Investigación o entre Centros Públicos y Centros Privados; hablo absolutamente en general; me permito recordar un librito del Ministro de Educación, editado ya hace muchos años, en el que se hablaba del trabajo científico en España y al hablar de las Relaciones Internacionales, señalaba que España estaba adherida al Consejo Internacional de Uniones Científicas y a la Unión Internacional de Radiociencia. Así era, pero también era cierto que en aquel entonces España estaba adherida a otras diez o doce Uniones Internacionales, con los estatutos de algunas de ellas aprobados por otros Ministerios y publicados, lo mismo que los nombramientos de sus miembros, en el Boletín Oficial del Estado y ni siquiera se mencionaban; lo más probable era que un Ministerio desconocía olímpicamente el trabajo de los otros.

Y no es que no se quiera coordinar; en mis largos años en el Observatorio he tenido ocasión de pertenecer a organismos relacionados con nuestro trabajo: Comisión Nacional de Geodesia y Geofísica, Comisión Nacional de Astronomía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica, Comité Científico y Técnico del Comité Nacional de Investigación del Espacio; y he de reconocer que en todos los estatutos he encontrado un párrafo en el que, con unas palabras u otras, se decía que aquel organismo era el órgano superior de promoción, coordinación y difusión, etc. Lo que ha sucedido es que tantos órganos superiores de coordinación no han podido coordinarse entre sí, porque todos eran «superiores», y por tanto la única manera de actuar era seguir su camino, sin ocuparse en lo posible de lo que hacían los demás.

Otra razón es de orden económico y no me refiero ahora directamente a la carencia de fondos para la investigación, que todos sabemos que es insuficiente, pero que también sabemos que nuestros investigadores son capaces de superarla en muchos casos con su trabajo e ingenio; es una situación, evidentemente, no recomendable, pero que hace que, a pesar de todo, podamos tener alguna esperanza; me refiero al problema más profundo de carencia de fondos por no planificar convenientemente la distribución de los mismos. Sé que España no es un país rico, aunque a veces se leen en la prensa declaraciones que indican que queremos entrar en el club de las naciones ricas; no lo somos y no podemos por tanto, gastar todo el dinero que deseáramos y que es necesario al planificar las subvenciones y consiguientemente las investigaciones; la gran planificación ha de estar al nivel más elevado pero este nivel no puede estar enterado de todo el espectro de la Ciencia y

de sus necesidades y por contrario sí que conoce muy bien los problemas del presupuesto; por ello es natural que, con demasiada frecuencia, se caiga en la tentación de aceptar planes nacionales de investigación que a corto o medio plazo sean rentables y no se piensa que sin el fomento de la ciencia básica, en la Universidad y en los Centros de Investigación, no tendremos en el futuro próximo los hombres preparados para poder llevar a cabo siquiera los planes de investigación rentables. Hay que tener presente que un Centro, para que pueda llevar a cabo investigaciones verdaderamente avanzadas, tiene que disponer de una infraestructura bien desarrollada y puesta al día; sin los medios básicos le será imposible el desarrollar planes avanzados y en muchos casos, la carencia de fondos para personal y para formarlo convenientemente en el extranjero, cuando en España esto no sea posible, limita la puesta al día del trabajo ordinario y consiguientemente hipoteca el desarrollo futuro. Es evidente que hay que ir en la línea de la investigación avanzada, pero creo, también, que en su planificación ha de entrar esencialmente el dotar a la Universidad y a los Centros de la infraestructura necesaria, que comprende no sólo edificios e instalaciones sino también, y muy principalmente, personal altamente capacitado.

Y finalmente, porque creo sinceramente en la capacidad de nuestra juventud estudiosa para ponerse a la altura internacional científica, sería necesario que se les diera la oportunidad de formarse fuera de nuestras fronteras en las especialidades en las que en casa nos hemos quedado atrasados, y a cambio de su esfuerzo, asegurémosles que al volver a su Universidad o a su Centro, encontrarán una plaza en la que podrán, ya ellos mismos, formar nuevas y competentes generaciones de investigadores y científicos.

Si hemos visto que el Geomagnetismo y la ciencia en general está en progreso, hemos de confiar que nuestros sucesores serán mejores ciertamente que el que ahora ha retenido vuestra atención por tanto tiempo.

**DISCURSO DE CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. D. MANUEL ALÍA MEDINA**

Constituye siempre un honor recibir el encargo, por parte de esta Academia de Ciencias, de contestar al discurso de ingreso de un nuevo Académico, como sucede ahora con el del P. José-Oriol Cardús Almeda.

Nació en 1914 y después de sus estudios de Comercio ingresó en la Compañía de Jesús, pasando más tarde a Italia donde obtuvo la Licenciatura en Filosofía en la Facultad Pontificia de Avigliana. Se licenció en Ciencias Físicas con Premio Extraordinario por la Universidad de Barcelona y también en Teología en la Facultad Pontificia de Dublín. En 1949 se incorporó al Observatorio del Ebro.

Su importante labor investigadora se ha dirigido al estudio del campo magnético, principalmente en su componente externa. Es así como entre sus abundantes publicaciones destacan las referidas a sondeos ionosféricos, variaciones en las capas ionosféricas, mareas lunares y solares en la Ionosfera, actividad solar y geomagnética, ciclo solar y radiación corpuscular, influencia lunar sobre corrientes telúricas, entre otras.

Ha participado en numerosas Asambleas Generales de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (Bruselas, Roma, Toronto, Helsinki, Berkeley, Zurich, Moscú, Grenoble, Canberra, Hamburgo y Vancouver). Igualmente en las Asambleas Generales de la Unión Internacional de Astronomía (Roma, Dublín, Berkeley, Hamburgo, Praga y Brighthton).

Por su brillante trayectoria investigadora fue designado y ocupó importantes cargos en el mundo de la Ciencia, entre otros los de Consejero de Número del Patronato Alfonso el Sabio del C.S.I.C., Miembro del Ejecutivo de la European Geophysical Society, Coordinador de Geomagnetismo en el Comité Internacional de los Años del Sol en calma, Vicepresidente del Comité Internacional para el Mapa Magnético Mundial y Vicepresidente y Secretario General de la Asociación Internacional de Geomagnetismo.

En la actualidad continúa trabajando en el Observatorio del Ebro, donde anteriormente fue director. Es Presidente también del Comité

Ejecutivo de la Comisión Nacional de Geodesia y Geofísica, Miembro de la Academia de Ciencias de Nueva York, Miembro de Honor de la IAGA y Oficial de las Palmas Académicas de Francia.

Breve resumen éste de sus actividades, pero que nos permite calibrar la calidad científica del recipiendario.

En el discurso que acabamos de oír se nos ha conducido, con la seguridad, concisión y aparente sencillez que sólo a experta mano le es permitido, a lo largo de un recorrido en el tiempo, para mostrarnos el gran desarrollo y avances conseguidos en el conocimiento del magnetismo terrestre. Y en lo que al espacio se refiere, nos ha situado finalmente en aquellas alturas de su preferencia, allí donde, como él mismo dice, en un simil, «los dos grandes antagonistas, el viento solar y el campo magnético terrestre chocan en el espacio».

De tan interesante recorrido histórico sólo unos breves comentarios acerca de dos puntos, por corresponder a hechos que, igualmente y además, tuvieron una gran influencia en el desarrollo de muchas de las denominadas Ciencias de la Tierra y del Espacio.

El primero se refiere a la mención que hizo de la importancia que tuvieron los proyectos de investigación coordinada y a escala mundial denominados Años Polares I y II. Proyectos ambos y más particularmente el segundo, a los que debemos considerar entre los antecesores o iniciadores de los que posteriormente se han venido celebrando, cada vez con mayor amplitud de convocatoria y objetivos. Así, el Año Geofísico Internacional, en 1957-58, el «Proyecto del Manto Superior», durante la década de los 60, el «Proyecto de Geodinámica» en la de los 70 y el de la «Litofera» en el que ahora nos encontramos. La abundancia y calidad de los resultados obtenidos les avalan ampliamente.

El segundo aspecto a destacar, también por su gran transcendencia, es el que se refiere a la utilización de los cohetes y sobre todo de los satélites artificiales. Bien conocidos son los avances con ellos conseguidos en muchas de las ramas de la Geodesia, Geofísica y Geología, por lo que, en la necesidad de abreviar, nos limitaremos ahora al mismo ejemplo expuesto por el P. Cardús, en el caso concreto del magnetismo. Decía: «Los primeros satélites revolucionaron a fondo el magnetismo por el descubrimiento de un plasma íntimamente unido al campo magnético terrestre», por el descubrimiento también «del confinamiento del campo magnético por el viento solar», por «la importancia que se concede a la aportación magnética del Sol por medio de partículas», etc. Y todo ello «como consecuencia fundamentalmente de los nuevos conocimientos que sobre la composición de la atmósfera y de sus propiedades ha proporcionado la nueva tecnología».

Brillantes resultados que, en efecto, se derivan en gran parte del hecho de que con los satélites se pudo alcanzar, penetrar y moverse dentro de los campos cuya investigación se requería. Por ello también

se explica que, comparativamente, los resultados obtenidos sobre el interior de la Tierra, en cuyo núcleo precisamente tiene su origen el campo magnético que nos ocupa, sean menos espectaculares. Porque nuestro planeta, con su solidez, viene sellando todo intento de penetración en su interior, impidiendo cualquier aventura similar a las espaciales.

Este interior inaccesible directamente para el hombre, ha sido sin embargo objeto siempre de su atención y preferente curiosidad y así, sobre su constitución, se ha especulado y se han expuesto muy diferentes modelos e hipótesis, con frecuencia contradictorias, algunas de las cuales han llegado prácticamente hasta nuestros días. Gracias a las esforzadas investigaciones realizadas podemos decir que, no obstante, disponemos ya de un modelo de constitución mayoritariamente aceptado.

Pero no por ello quedan resueltas muchas cuestiones trascendentales. Recordemos, como ejemplos, algunas. Falta por conocer con exactitud el elemento o elementos que acompañan en el núcleo al hierro mayoritario. Sobre el acoplamiento entre el núcleo externo líquido y el manto sólido se ha invocado muy diferentes causas, la inercia, la gravedad, el magnetismo, fuerzas viscosas y turbulentas en la interfase y hasta un ensamblaje de tipo topográfico, por la existencia de «chichones» generados por «remolinos» en las zonas externas del núcleo. Últimamente, sin embargo, por determinaciones geodésicas, utilizando las radiaciones de los quásares, se ha llegado a deducir que el acoplamiento del manto-núcleo es menos rígido de lo que se suponía.

De otra parte tampoco se conoce suficientemente el desarrollo, dentro del núcleo externo, de los flujos a los que se supone responsables del campo magnético, ni tampoco las causas que los motivan. Algo parecido sucede por lo que se refiere a los motivaciones de las inversiones del campo dipolar terrestre, de tanto interés para las determinaciones geológicas.

Cuestión importante fue siempre la de explicar la gran antigüedad y persistencia del campo magnético terrestre, superior a los 3.000 millones de años. Cuestión importante y relacionada con la misma formación del núcleo terrestre y con la fuente o fuentes capaces de mantener el funcionamiento de la dinamo terrestre durante tan largos períodos de tiempo. Muchas otras preguntas quedan además implicadas en este último planteamiento.

Son éstos, en fin, simples enunciados de alguno de los temas pendientes. La verdad es que de lo acabado de exponer, no sólo puede confirmarse el relativo desfase en el avance de los conocimientos, como al principio indicábamos, sino también los meritorio de lo ya conseguido, dado el afinamiento de muchas de las preguntas planteadas.

Las soluciones a estas y otras cuestiones seguirán basándose, como hasta ahora, en los métodos indirectos, con el apoyo además de los resultados conseguidos en los campos de investigación próximos, entre los cuales figura el que con tanta dedicación como éxitos viene cultivando el P. Cardús, a quien me permito ahora adelantar mi personal bienvenida.