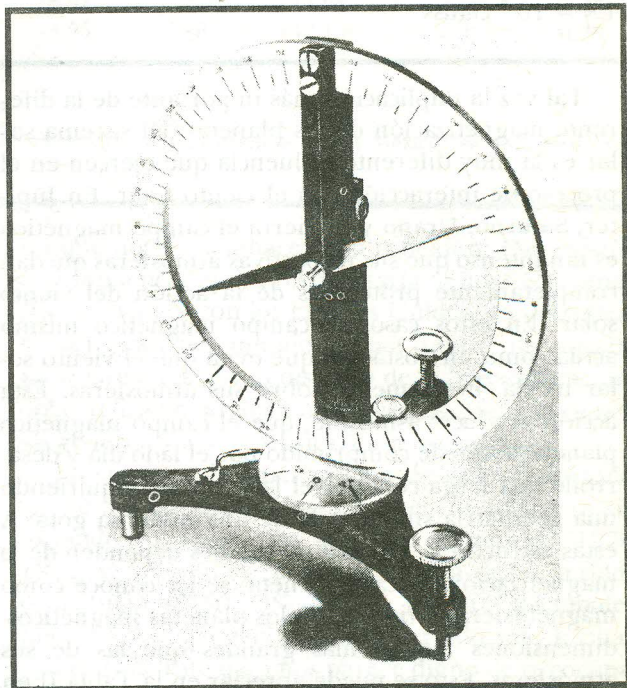


LA MAGNETIZACION DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR Y SU RELACION CON LA EVOLUCION DE SUS ATMOSFERAS

Héctor Pérez de Tejada

A más de 20 años de haberse iniciado la exploración de los planetas del sistema solar, por medio de vehículos y satélites artificiales, es mucho lo que se ha aprendido sobre las características de sus superficies, sus atmósferas y los campos magnéticos que poseen. Entre los resultados más importantes derivados de esta exploración sobresale la extrema variedad de la magnetización intrínseca en los diferentes cuerpos del sistema solar. Existe, de hecho, una nueva jerarquía planetaria ordenada con base en la intensidad de los campos magnéticos que se han medido. Aún cuando las características de estos campos son, en muchos casos, completamente diferentes, es posible establecer una escala comparativa entre ellos por medio de parámetros que identifican las propiedades de campos magnéticos equivalentes reproducidas por las observaciones. El más importante de éstos es el momento magnético dipolar equivalente de cada planeta que produce, en primera aproximación, intensidades magnéticas comparables a las medidas en su vecindad. Esta representación del campo magnético planetario se puede ajustar más, orientando adecuadamente el eje del dipolo y desplazando su posición dentro del planeta hasta lograr reducir al mínimo las diferencias entre los valores calculados y los medidos.

En la Tabla I se presenta una relación de los momentos magnéticos de los dipolos equivalentes de los planetas en donde han habido observaciones *in situ*, junto con la intensidad magnética esperada en sus superficies. Lo más notable de estos números es la muy variada magnetización que existe en todo el sistema solar. Se aprecia, por ejemplo, que existen 2 grupos principales de planetas de muy diferente magnetización. Júpiter, Saturno, Urano y la Tierra forman el grupo de los llamados planetas magnéticos porque poseen magnetizaciones que dan lugar a campos magnéticos importantes en sus superficies observadas. A Mercurio, Marte y Venus se les clasifica, por otra parte, como planetas de débil magneti-



zación por la baja intensidad magnética que se observa en sus superficies. Es de notar que entre Júpiter (el planeta de más alta magnetización) y Venus (el menos magnetizado) hay una diferencia de casi 9 órdenes de magnitud en el valor del momento dipolar magnético correspondiente y aproximadamente 5 órdenes de magnitud en la diferente intensidad del campo magnético en sus superficies observadas. La Tierra tiene, por otro lado, una magnetización importante aunque muy inferior a la de los planetas mayores. A pesar de esto, la intensidad magnética en la superficie terrestre es comparable a la esperada en las superficies de Saturno y Urano. Esto se debe a que el radio planetario de estos últimos es mucho mayor que el de la Tierra (La intensidad del campo magnético dipolar decrece como $1/r^3$ y es, por tanto, mucho menor cuando el radio planetario es muy grande).

Tabla I

Júpiter	1.5×10^{30} Gauss cm^3	400 000 γ
Saturno	4.4×10^{28} Gauss cm^3	20 000 γ
Urano	8.0×10^{26} Gauss cm^3	50 000 γ
Tierra	8.2×10^{25} Gauss cm^3	30 000 γ
Mercurio	2.4×10^{22} Gauss cm^3	160 γ
Marte	$\sim \times 10^{22}$ Gauss cm^3	30 γ
Venus	$< \times 10^{21}$ Gauss cm^3	4 γ

$$1 \gamma = 10^{-5} \text{ Gauss}$$

Tal vez la implicación más importante de la diferente magnetización de los planetas del sistema solar es la muy diferente influencia que ejercen en el proceso de interacción con el viento solar. En Júpiter, Saturno, Urano y la Tierra el campo magnético es tan intenso que sus respectivas atmósferas quedan completamente protegidas de la acción del viento solar. En estos casos el campo magnético mismo actúa como un obstáculo que evita que el viento solar incida directamente sobre sus atmósferas. Esta acción produce, asimismo, que el campo magnético planetario quede comprimido por el lado día y desarrolle una larga cola por el lado noche adquiriendo una geometría similar a la de una inmensa gota. A estas estructuras, cuyas dimensiones dependen de la magnetización de cada planeta, se les conoce como magnetósferas y tienen, en los planetas magnéticos, dimensiones mucho más grandes que las de sus atmósferas. Esto se puede apreciar en la Tabla II en donde se presentan, junto con el radio planetario, la posición de la frontera de la magnetósfera (llamada magnetopausa) en la dirección del Sol. Para Júpiter, en particular, la magnetósfera se extiende hasta unos 7 millones de kilómetros por delante del planeta; o sea, aproximadamente unas 100 veces el radio planetario visible. Este último resulta ser una buena medida de las dimensiones de la atmósfera pues ésta no se extiende mucho más allá de aquél. Para Saturno y Urano la situación no es tan extrema aunque de cualquier manera sus magnetósferas se extienden por lo menos 20 veces más que sus atmósferas. En el caso de la Tierra la magnetósfera es todavía bastante mayor (unas 10 veces) que las dimensiones de la atmósfera, de suerte tal que, como en los planetas más magnéticos, ésta última queda ampliamente resguardada del viento solar.

Tabla II

	Radio Planetario	Posición de la magnetopausa
Júpiter	71 000 km	7 000 000 km
Saturno	60 000 km	1 400 000 km
Urano	25 000 km	450 000 km
Tierra	6 380 km	66 000 km
Mercurio	2 440 km	3 000 km
Marte	3 400 km	4 000 km
Venus	6 050 km	6 300 km

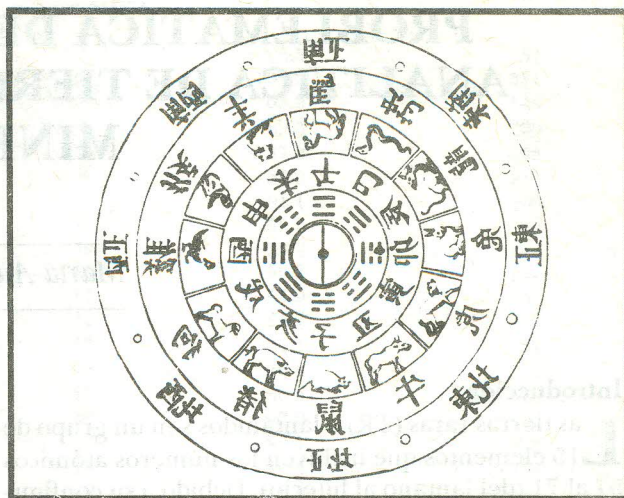
Lo contrario puede decirse, por otro lado, de los planetas débilmente magnetizados (Mercurio, Marte y Venus) en donde las dimensiones de las magnetósferas correspondientes son enteramente comparables a los radios planetarios. En estos casos el viento solar tiene acceso directo a sus atmósferas y da lugar a procesos de erosión que no se generan en los planetas magnéticos. Esta condición es particularmente crítica en Venus, donde el campo magnético planetario es tan débil que no juega ningún papel importante en el proceso de interacción con el viento solar. Bajo tales condiciones, es la misma atmósfera, o más apropiadamente la ionósfera (formada por las partículas ionizadas de aquélla) la que sufre la acción del viento solar. Como resultado de ello la ionósfera del hemisferio día es comprimida hacia el planeta y deformada hacia el lado noche. Conforme esto ocurre, la ionósfera pierde gradualmente grandes fragmentos, en forma de nubes, que son arrastrados por el viento solar y que causan, en última instancia, una pérdida importante del material atmosférico del planeta.

El proceso de erosión que se observa en Venus no existe en ninguno de los planetas magnéticos y tiene, indudablemente, fuertes implicaciones relacionadas con la evolución de la atmósfera venusina. Un problema relevante, a los efectos que esto pudo haber tenido a lo largo de su historia, es la conspicua ausencia, hoy día, de una gran cantidad de agua que debió haber existido en la superficie de ese planeta hace muchos cientos de millones de años. Una posibilidad es que una buena parte del agua se perdió en el espacio conforme sus moléculas fueron gradualmente fotodisociadas e ionizadas por la radiación solar, y posteriormente arrastradas por el viento solar. Esta proposición es apoyada por el hecho de que la componente principal de la ionósfera superior de

Venus está formada, precisamente, por iones de oxígeno, los cuales resultan de la fotodisociación e ionización del agua. A diferencia de otros gases, como el CO₂, que son más abundantes en la baja atmósfera de Venus, los átomos del oxígeno atómico tienden a difundirse rápidamente hacia las capas superiores de la ionósfera, en donde sufren la acción del viento solar. Como resultado de esta cadena de eventos es de esperarse que a lo largo de muchos millones de años apareciera una deficiencia real de átomos y moléculas de oxígeno en la composición general de la atmósfera.

Una situación similar pudo también haber ocurrido en Marte, en donde, a pesar de que el campo magnético planetario es menos débil que en Venus, no es capaz de evitar que el viento solar incida sobre su ionósfera y erosione sus capas superiores. En este caso las implicaciones de esa acción pudieron haber sido de mayores consecuencias pues, a diferencia de Venus, la atmósfera de Marte es extremadamente tenue. Es muy posible que en buena medida el viento solar haya sido responsable de ello, y que la erosión sufrida por su atmósfera a lo largo de muchos millones de años sea la causa de las condiciones que existen hoy día. Esta suposición es apoyada por la presencia de canales fluvíaticos en la superficie del planeta. Tales canales evidencian que, en alguna ocasión, hubo grandes cantidades de agua en su atmósfera y que ésta llegó a ser mucho más densa de lo que es hoy. Hay quienes sugieren que esa agua se encuentra congelada en el subsuelo marciano. Sin embargo, al igual que en Venus, las capas superiores de la ionósfera del planeta están dominadas por iones de oxígeno, así que fenómenos similares a los supuestos para Venus pudieron haber ocasionado, en Marte, resultados análogos; esto es, su atmósfera pudo haber ido perdiendo gradualmente las partículas de agua conforme estas eran fotodisociadas e ionizadas por la radiación solar. Independientemente de estos efectos, la pérdida de material atmosférico en Marte debió haber sido más rápida que en Venus por la circunstancia adicional de que el campo gravitatorio marciano es mucho más débil que el de Venus y permite, por tanto, una más acelerada evaporación térmica de las partículas atmosféricas.

Un caso igualmente notable lo representa Mercurio, en donde, a pesar de que su débil campo magnético induce una magnetósfera cuyas dimensiones apenas exceden las del planeta, resulta ser ésta, de todas maneras, el único obstáculo que se opone al paso del viento solar. Esto se debe a que Mercurio prácticamente no tiene ninguna atmósfera



y por tanto no existe una ionósfera que interaccione con el viento solar. Debido a esta circunstancia las condiciones en Mercurio se ajustan más a las de los planetas magnéticos y difieren notablemente de las que existen en Venus y Marte. Hay que recalcar, sin embargo, que si el planeta tuviera una atmósfera apreciable sería ésta la que actuara como obstáculo principal al paso del viento solar, y habría que pensar que dicha atmósfera sería fuertemente afectada por procesos de erosión. En este sentido es inescapable la posibilidad de que el actual estado de cosas en Mercurio haya sido resultado de esa acción, y que el planeta ha llegado a la situación extrema en que la erosión acabó completamente con su atmósfera.

Lo que se ha escrito aquí sirve para enfatizar la importancia de la magnetización interna de cada planeta en relación con el sostenimiento de su atmósfera y, en particular, es útil para señalar que en buena medida el campo magnético de nuestro planeta ha sido clave en el mantenimiento de nuestra atmósfera. Indudablemente que sus características serían muy diferentes si el campo geomagnético hubiera permitido al viento solar erosionar fuertemente, y durante mucho tiempo, las capas superiores de la ionósfera. No es aventurado pensar que tal situación hubiera, inclusive, afectado la evolución de las especies y que otras fueran las condiciones que prevalecieran sobre la superficie terrestre. Es por lo mismo evidente que el estudio de las atmósferas y campos magnéticos de otros planetas, además de conducir a información, en sí valiosa, sobre las condiciones existentes en otros ámbitos, proporciona elementos de juicio con los cuales se puede valorar más adecuadamente la serie de circunstancias tan especiales que hicieron de la Tierra una morada única en el sistema solar.