

SOBRE EL PROBLEMA DEL CAMPO MAGNETICO GENERAL DEL SOL Y EL EFECTO DE ALBEDO*

Manuel Sandoval Vallarta

Ante todo quiero expresar mi profunda gratitud al Comité Organizador de este Congreso por la amable invitación que me extendió para venir a Tokio. **Esto** cumple la esperanza que he tenido por muchos años de visitar Japón. Tengo la mayor admiración por el eminente grupo de físicos japoneses.

Abordaré el problema del campo magnético general del sol y después, si el tiempo lo permite, el del albedo.

El problema del campo magnético general del sol ha sido reavivado por los experimentos recientes del Neher y Van Allen, los primeros con la técnica del globo sonda a gran altura y los segundos con la de los cohetes. Estos dos experimentos indican que realmente existe una latitud, más precisamente una latitud geomagnética, más allá de la cual la intensidad de la radiación cósmica permanece constante, es decir, hay una rodilla en el efecto de latitud que se encuentra alrededor de 58° de latitud geomagnética. Ahora bien, desde el punto de vista de la tierra, el hecho de

*Memorias de la Conferencia Internacional de Física Teórica, Kioto y Tokio, Página 57.

que hay una latitud más allá de la cual la intensidad permanece constante significa que el cono permitido que pertenece a una cierta energía crítica está completamente abierto. Desde el punto de vista del sol, si éste posee realmente el campo magnético general, el cono permitido que corresponda a dicha energía crítica está completamente cerrado. Antes de seguir adelante, prefiero exponer claramente las suposiciones sobre las que está basada esta explicación, porque en este momento hay una gran necesidad de evaluación crítica y para que más adelante puedan todos apreciar lo que vale la teoría que voy a describir. La suposición inicial es que el campo magnético general del sol, del mismo modo que el de la tierra, pueda desarrollarse en términos de esféricos armónicos. De acuerdo con teoremas bien conocidos de la teoría del potencial, el primer término de este desarrollo es el dipolo, el segundo el cuadrípulo y así sucesivamente. Esto supone que el campo magnético del sol cumple la condición de ser estático, cuando menos como una buena aproximación. Esto no sería cierto si las ideas de Alfvén sobre las oscilaciones del plasma en la atmósfera del sol, que se extenderían a grandes distancias fueran exactas. Sin embargo, si se hace la suposición antes dicha, se deduce un cierto número de consecuencias.

La primera es que la rodilla del efecto de latitud debe estar a 58° de latitud geomagnética aproximadamente. La condición a que me referí hace un momento entonces con facilidad que el momento del dipolo del sol vale 0.6×10^{34} gauss-cm³. Si el sol tiene realmente este momento dipolar, entonces se siguen forzosamente otras consecuencias.

La segunda es que la rigidez magnética de todas las componentes de la radiación cósmica primaria tiene que ser la misma. La radiación primaria consiste, como se sabe, no solo de protones sino también de núcleos pesados que van desde el helio hasta el hierro, tal vez más allá. Como el valor del parámetro de Störmer tiene que ser el mismo para todos, si realmente existe el campo magnético del sol, se sigue que la rigidez magnética de todas las componentes debe ser la misma. Esta consecuencia no se ha comprobado todavía experimentalmente en su totalidad. Sólo se sabe que la rigidez magnética del helio de la radiación primaria es la misma que la de los protones, pero no para los núcleos más pesados. (Nota

agregada en julio de 1955, al tiempo de preparar la segunda publicación de este trabajo: Se sabe por nuevos experimentos de van Allen que la rigidez magnética de todas las componentes de la radiación primaria es la misma).

La tercera es que la energía límite de las diversas componentes tiene que ser distinta. Se puede calcular fácilmente que si el sol tiene un momento dipolar del valor ya citado, la energía límite de los protones es aproximadamente 0.6 Bev, 0.9 Bev para el helio y así sucesivamente hasta la componente más pesada. Mientras que la relación entre la masa y la carga permanece constante, es decir 2 a 1, la energía que se aumenta por cada nucleón es siempre la misma, de modo que si hay aumento constante en el número de nucleones, también hay aumento constante en la energía límite de un núcleo al siguiente. Esta consecuencia no se ha comprobado experimentalmente. El experimento que se necesita hacer es en principio el mismo que el de Bradt y Peters, quienes demostraron que los núcleos pesados de la radiación primaria llegan ya a la región activa del campo magnético terrestre sin sus capas de electrones. La diferencia es que el experimento a que aludo ahora debe hacerse a alta latitud y a grande altura, de otro modo no se puede alcanzar la energía límite. Esto introduce nuevas dificultades, de las que tal vez la principal es la recuperación de las placas fotográficas que han sido enviadas hasta casi fuera de la atmósfera por medio de cohetes, para que puedan ser analizadas. Este problema será tal vez difícil de resolver a alta latitud.

La cuarta es que debe existir una variación diurna de la intensidad de la radiación cósmica, la que debería observarse sobre todo en la región alrededor de la rodilla del efecto de latitud. La razón de este efecto diurno es que hay dos conos permitidos: el del sol y el de la tierra. A la distancia de la tierra al sol aquél afecta a los protones de energía comprendida entre 6 y 0.6 Bev, y energía correlativamente mayor de las otras componentes de la radiación primaria. El cono solar está fijo con respecto al sol, en tanto que el terrestre está fijo con respecto a la tierra. A medida que la tierra gira alrededor de su eje, la región común a los dos conos varía periódicamente y por lo tanto también la intensidad de la radiación cósmica primaria. Que este análisis es correcto en lo esencial se deduce de la circunstancia de que la intensidad en la tierra del campo magnético del sol es -

del orden de 10^{-5} a 10^{-6} gauss, mientras que el de la tierra es del orden de 0.5 gauss, de modo que los dos conos permitidos, el del sol y el de la tierra, son esencialmente independientes el uno del otro. Esta conclusión, sin embargo, tiene que modificarse al tomar en cuenta los estudios de Wheeler y sus colegas de Princeton, en el sentido de que desprecia la dispersión de los rayos cósmicos primarios al pasar por el campo magnético terrestre. Esta dispersión altera el momento angular de la partícula relativo al eje del dipolo del sol y por lo tanto transforma órbitas no acotadas en órbitas acotadas, es decir, órbitas que vienen del infinito en órbitas que permanecen a distancia finita de la órbita de la tierra.

El orden de magnitud del efecto diurno esperado es entre el 5 y el 10 %, pero la corrección que introduce la dispersión estudiada por Wheeler y sus colegas, lo reduce al 2 ó 3 %. Todavía no hay seguridad de que este efecto realmente existe. Se sabe que hay un efecto diurno, pero se sabe también que es un fenómeno muy complejo. Hay, en efecto, muchos factores que intervienen en el resultado. Esto se demuestra con mucha claridad con los trabajos de algunos físicos japoneses que vamos a escuchar en este congreso y también por la labor de Duperier en Londres, quien ha puesto en evidencia que el verdadero problema es desentrañar del efecto diurno observado lo que corresponde a los diversos factores que entran en juego, por ejemplo, la anisotropía de la radiación primaria, las variaciones del campo magnético terrestre, los factores meteorológicos y, finalmente, la influencia del campo magnético solar. Este problema no está todavía resuelto.

Además debe existir una variación de intensidad con período de 27 días que se debe a que, si el dipolo solar no está alineado con el eje de rotación del sol, a medida que el sol gira alrededor de su eje la latitud heliomagnética de la tierra cambia y en consecuencia también varía la intensidad de la radiación cósmica. Por otra parte, si el momento del dipolo coincide con el eje de rotación, la tierra está siempre en el ecuador heliomagnético y el efecto en cuestión no existe.

Luego debe haber un efecto dependiente de las estaciones del año, con período de seis meses. La razón es que, si el dipolo solar no es perpendicular a la eclíptica, a medida que la tierra se mueve en su órbita su latitud heliomagnética también cambia. Este efecto tiene que ser mucho más pequeño que los dos an-

teriores. Sería muy interesante observar la variación con período de 27 días y la que tiene período de seis meses, porque así se tendrían dos métodos para averiguar la orientación del dipolo del sol. Uno daría el ángulo con el eje de rotación, el otro con la eclíptica.

Finalmente habría otra variación de intensidad con período de un año que se debe a la excentricidad de la órbita de la tierra, que tiene que ser muy pequeña porque la excentricidad es muy pequeña. Esta variación es análoga al efecto de longitud en la tierra y tiene por origen que la distancia de la tierra al sol varía periódicamente a medida que la tierra recorre su órbita.

La situación, por consiguiente, en el momento presente es como sigue: sabemos que hay una rodilla en el efecto de latitud, sabemos que la rigidez magnética límite de las diversas componentes de la radiación primaria es la misma para todas, sospechamos que esto se debe a la existencia de un campo magnético general del sol, pero otras consecuencias que forzosamente siguen, si realmente existe dicho campo, no han sido observadas.

Hay todavía otro problema sin resolver. El valor del campo magnético en la superficie del sol, determinado por medio de experimentos con los rayos cósmicos no coincide con el valor encontrado por el efecto Zeeman según el método de Hale desarrollado hace muchos años. Si el sol tiene un dipolo magnético de 0.6×10^{34} gauss-cm³ el campo en la superficie es del orden de 20 gauss. Mediciones recientes de Thyssen y de Babcock no dan más de 1 a 2 gauss. La discrepancia es de un orden de magnitud, y no sabemos por qué. Alfvén ha sugerido una idea digna de estudiarse con más cuidado, pero en el momento presente no podemos decir si es correcta o no. Según él hay una región turbulenta en las capas superiores de la atmósfera solar y, debido a la turbulencia, se absorbe el campo magnético general que, en consecuencia, no puede medirse por el efecto Zeeman. Para convertir esto en un cálculo es preciso saber la función de absorción en la región turbulenta, cosa que nadie se atreve a precisar. Si se hace una hipótesis *ad hoc* naturalmente se llega al resultado deseado, y se puede disminuir el campo en la superficie de 20 gauss a 2 gauss. En resumen, la idea de Alfvén no se ha podido comprobar todavía.

Hay además alguna prueba adicional indirecta de la existencia del campo general del sol, que voy a discutir brevemente aquí y que tiene que ver con el aumento brusco de la intensidad de la radiación cósmica que acompaña algunas veces a las grandes erupciones solares. Se sabe que no toda erupción solar se ve acompañada por un aumento de la radiación cósmica; algunas, sin embargo, tienen por séquito un enorme aumento. La prueba indirecta viene así: se puede demostrar que, si la relación entre la orientación, por un lado, la magnitud, por otro, del dipolo permanente del sol y la orientación, por un lado, la magnitud, por otro, del dipolo transitorio de un par de manchas solares es la adecuada, entonces, al aplicar la condición de que en la región de movimiento permitido la energía cinética es positiva, (que es el principio de la condición de Störmer) se ve que hay un túnel perforado a través de la región prohibida de Störmer y por este túnel las partículas cargadas pueden escapar del sol. En todos los casos que hemos estudiado hasta ahora, si se cumple la condición adecuada entre los dos dipolos se observa aumento en la intensidad de la radiación cósmica, si no se cumple no la hay. Si el sol no tuviera un campo general entonces, siempre que hubiera una erupción solar se debería observar un aumento correlativo en la intensidad, que no se observa excepto cuando se cumplen las condiciones que ya he mencionado. En consecuencia, es una prueba indirecta en favor de la existencia del campo general.

Hay todavía más. Es bien sabido que las manchas solares están asociadas con campos magnéticos variables con el tiempo. Si la densidad de carga no es superior a 10^8 cargas elementales por centímetro cúbico que ya es muy alta, se puede demostrar que hay suficiente energía en el campo de una mancha para acelerar toda la carga que existe en su vecindad, tanto positiva como negativa. La carga positiva existe en forma de protones y iones en diversos grados de ionización, aún núcleos desnudos que se convierten en rayos cósmicos, y todos ellos son acelerados por la acción del campo magnético variable de las manchas. Pueden escapar por el túnel de que hablé antes. La carga negativa también tiene que ser acelerada, y ésta existe en forma de electrones. Como los electrones son mucho más ligeros que las partículas positivas, la radiación electromagnética emitida durante el periodo de aceleración es mucho mayor que la emitida por las partículas

positivas. La órbita durante la aceleración ha sido ya calculada y, aplicando fórmulas bien conocidas de Pomeranchuk y Schwinger, se puede calcular el espectro de la radiación electromagnética para diversas porciones de la órbita de aceleración. Dicho espectro tiene dos picos marcados: uno entre 10 y 20 cm. y otro alrededor de 2 m. de longitud de onda. Se sabe que cuando el sol está en período activo, hay un aumento muy grande en la intensidad de la radiación electromagnética emitida, y una buena parte aparece en las regiones citadas del espectro electromagnético. Aumentos del orden de 10^3 a 10^4 han sido observados con frecuencia.

No sabemos con precisión en dónde ocurre la emisión en el sol. La razón es que el sol visto de la tierra subtende un ángulo muy pequeño y es difícil seleccionar en su superficie, por métodos bien conocidos para medir la radiación emitida, precisamente de qué lugar viene ésta. Según la teoría bosquejada arriba, la región activa debería estar en la mancha misma o en su proximidad. Experimentalmente es un problema difícil escoger una región pequeña en la superficie del sol y medir la radiación que viene precisamente de esa región. En la actualidad se puede medir la que proviene de todo el disco solar, pero tal vez se puede esperar que con mejoras en la técnica se logren hacer experimentos más refinados en el porvenir. De nuevo esto proporcionaría una prueba indirecta de la existencia del campo general del sol, porque la carga negativa se aceleraría en la región de movimiento permitido, pero no necesariamente abierta al exterior, es decir, la radiación electromagnética pasa por las regiones prohibidas de Störmer sin necesidad de túnel - porque no tiene carga eléctrica. La región de Störmer está prohibida sólo para las partículas con carga, pero no para la radiación.

Unas cuantas observaciones ahora sobre el problema del albedo de la radiación cósmica primaria. Creo que este es un problema de primerísima importancia. Está relacionado con las discrepancias que se han encontrado, por ejemplo, entre el espectro de la radiación primaria determinado por el efecto de latitud en la dirección vertical y el deducido del efecto azimutal a una latitud fija. Los dos no son iguales y esto demuestra la existencia del albedo. ¿Qué es el albedo? Supongamos la tierra y su atmósfera y hagamos una medición direccional de intensidad fuera de la atmósfera en un punto dado. Lo siguiente puede acontecer: una

partícula de alta energía choca con un núcleo en la atmósfera y produce una estrella. Una partícula cargada de esta estrella, emitida en cualquier dirección apropiada, es capturada por el campo magnético terrestre que la obliga a describir una trayectoria y llegar al punto donde se efectúa la medición precisamente en la dirección en que se mide la intensidad. A este fenómeno le hemos llamado albedo distante.

Hay otro tipo de albedo, que voy a describir brevemente, al que he llamado albedo de salpicadura: una partícula primaria de alta energía choca con un núcleo en la atmósfera en la proximidad del aparato de medida, produce una estrella y envía otra partícula secundaria en la dirección de la tierra hacia afuera. Si el aparato de medida es un contador de Cerenkov, puede distinguir si la partícula lo atraviesa en un sentido o en el opuesto, pero si es un tren de contadores Geiger no puede hacerlo. Este contaría una partícula de albedo como si fuera primaria.

El problema es analizar las trayectorias del albedo distante y la probabilidad del de salpicadura. La dificultad de las primeras es que, como permanece a distancias de la superficie terrestre del orden de magnitud del radio de la tierra, no se puede emplear sólo la componente dipolar del campo magnético. Es preciso además tomar la componente del cuadripolo y tal vez aún la componente debida a las corrientes ionosféricas.

Ya se ha llevado a cabo parte de este análisis, que incluye el dipolo y el cuadripolo terrestres, pero tal vez será necesario refinarlo más e introducir la perturbación de las trayectorias debida a las corrientes ionosféricas. No se ha terminado todavía este trabajo, ni tampoco el análisis estadístico. La integración se hace con máquinas comerciales IBM. No presenta dificultades especiales porque todas las trayectorias son cortas.

Las trayectorias del albedo distante tienen parentesco próximo con las orbitas de sombra que determinan la frontera del cono de sombra y que tienen también la propiedad de permanecer por algún tiempo a distancias de la tierra del orden de magnitud de su radio. Los conos de sombra determinados por Schremp en 1938 no toman en consideración el cuadripolo del campo terrestre y están sujetos a revisión. Para ello aprovechamos las trayectorias del albedo.