

SOBRE LA RELACION ENTRE LA RADIACION ELECTRO-
MAGNETICA Y LA RADIACION COSMICA EMITIDAS POR EL SOL

Manuel Sandoval Vallarta

Es bien sabido, a consecuencia de las observaciones de Forbush confirmadas por otros físicos, que, por una parte, en ciertas raras ocasiones y asociada con las grandes erupciones solares, la intensidad de la radiación cósmica aumenta hasta el doble de su valor normal. Este aumento se observa en la Tierra a latitudes geomagnéticas moderadas y altas pero no cerca del ecuador. Por otra parte, siempre o casi siempre que aparecen manchas en la superficie del Sol hay un aumento muy considerable en la intensidad de la radiación electromagnética que viene directamente del astro. Este aumento se percibe principalmente en la región de longitudes de onda de algunos centímetros y de algunos metros. Nos proponemos dar aquí una teoría de estos dos fenómenos.

El primer elemento que interviene en la teoría es el campo magnético permanente del Sol. Hay gran incertidumbre sobre sí, a semejanza de la Tierra, nuestra estrella más vecina posee un campo magnético permanente y las observaciones de que se dispone son en gran parte contradictorias. Estas observaciones son de dos clases: las que se refieren a la radiación cósmica y las que tienen que ver con

el corrimiento Zeeman de las rayas espectrales emitidas en la superficie del Sol. En efecto, los numerosos trabajos teóricos realizados hasta hoy por Janossy, Epstein, Vallarta y Godart y más recientemente por Dwight indican que la existencia de un campo magnético permanente del Sol tiene numerosas consecuencias, casi todas de magnitud observable, sobre la intensidad de la radiación cósmica. El más notable, en primer lugar, es que las partículas cargadas de baja energía se ven imposibilitadas para llegar a la Tierra. Como resultado, la intensidad de la radiación cósmica tiene que permanecer constante a partir de una cierta latitud geomagnética. En segundo lugar, tienen que aparecer variaciones periódicas de la intensidad, de las cuales la más notable es la variación diurna, y además variaciones mensuales, semestrales y anuales que deberían ser observables sobre todo a gran altura sobre el nivel del mar y a altas latitudes. Los experimentos realizados hasta ahora son en parte contradictorios pero en general arrojan un resultado negativo. Lo mismo pasa con el corrimiento Zeeman de las rayas espectrales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos últimos experimentos son de índole muy delicada, ya que se trata de medir un efecto muy pequeño al que están superpuestos otros efectos espúreos mayores o iguales al buscado.

Los experimentos anteriores a la segunda guerra mundial colocaban la "rodilla" del efecto de latitud de la radiación cósmica a 52° de latitud geomagnética, lo cual conduce a un valor del momento del dipolo magnético solar de 10^{34} gauss-cm³ y a un campo magnético en el ecuador del Sol de aproximadamente 30 gauss. Este valor está de acuerdo con el encontrado por Hale y sus colaboradores y basado en el corrimiento Zeeman de las rayas espectrales en el Sol. Con este valor del dipolo magnético solar se puede calcular que a 55° de latitud geomagnética debería haber un efecto diurno de más de 5%. Los experimentos recientes están en desacuerdo sobre la existencia real de la "rodilla" y, si existe, sobre su latitud y no han revelado con seguridad ningún efecto diurno. Por otra parte, los experimentos recientes de Thyssen y Babcock sobre corrimiento Zeeman de las rayas solares arrojan como resultado que si hay en realidad un campo magnético tiene que ser inferior a 2 gauss. En resumen no hay seguridad sobre el valor del campo magnético general permanente ni siquiera sobre su existencia real. Las

consideraciones que exponemos a continuación, sin embargo, son independientes del valor de dicho campo. Podría ser 100 veces inferior al citado más arriba sin afectarlas.

El segundo elemento que interviene en la teoría es el campo magnético local de las manchas solares. Sobre éste se pueden hacer afirmaciones mucho más seguras que sobre el campo general. Se sabe con seguridad, primero, que las manchas van acompañadas de un campo magnético cuyo valor máximo es del orden de magnitud de varios millares de gauss, segundo, que aumenta gradualmente al principio y disminuye poco a poco al fin de la vida de la mancha, conservando un valor constante durante más de la mitad de dicha vida; tercero, que las manchas siempre aparecen a latitudes solares moderadas y en pares de polaridad opuesta. No se conoce con precisión la ley de variación del campo en función del tiempo ni se sabe nada sobre cómo varía en el espacio en función de la distancia al eje de la mancha. A distancias suficientemente grandes del par de manchas y como consecuencia de teoremas generales de la teoría del potencial el campo magnético de dicho par es el de un dipolo.

El tercer elemento que interviene en la teoría es la existencia de una alta densidad de carga libre en la atmósfera solar. Esta carga libre, formada por electrones, protones y iones en diversos grados de ionización, es de densidad muy elevada, posiblemente hasta 10^{23} cargas elementales por centímetro cúbico y su existencia está asegurada por numerosas observaciones sobre las que no insistiremos aquí.

Pasamos ahora a exponer a grandes rasgos la teoría. Puesto que el campo magnético de una mancha varía con el tiempo, hay una fuerza electromotriz dada por la ley de Faraday que actúa sobre toda partícula cargada que se encuentre en el campo y la pone en movimiento. Suponiendo que la variación con el tiempo se rige por la curva de Cowling y que el campo varía en el espacio inversamente con la distancia del eje de la mancha, hemos estudiado por integración numérica las órbitas que describe una partícula cargada durante el tiempo de la aceleración. Como los exponentes característicos de Poincaré son positivos, el movimiento es inestable tanto en la dirección radial como en la axial y la trayectoria se separa

rápido tanto del plano como del eje de la mancha. Con los valores numéricos correspondientes a manchas observadas resulta que un protón, por ejemplo, puede adquirir energías hasta de 6 Bev. Naturalmente que este proceso de aceleración se aplica a todas las partículas cargadas que estén presentes en el campo magnético, electrones, protones, iones o núcleos desnudos.

Esto nos lleva a discutir brevemente una objeción hecha por Alfvén, y repetida después por Kiepenheuer y otros astrofísicos. Consiste en afirmar que, debido a la alta densidad de carga, el generador mencionado arriba, que nosotros hemos bautizado con el nombre de "cignatrón", está de hecho en corto circuito y el proceso no puede en realidad seguir adelante. Esta aseveración parece fundarse en un error. Un generador electromagnético, en efecto, está en corto circuito y muere siempre y cuando no hay suficiente energía disponible en el sistema para mantener el campo magnético variable. Pero éste no es el caso para las manchas solares. Un cálculo sencillo revela, en efecto, que la energía disponible supera por un factor muy grande que puede llegar hasta $10^5 - 10^6$ a la energía necesaria para acelerar todas las partículas libres que se encuentran allí. La objeción de Alfvén, en consecuencia, carece de validez.

Hemos mencionado que las manchas solares se presentan a latitudes solares moderadas. Si el Sol tiene un campo magnético general permanente, cualquiera que sea su valor dentro de ciertos límites no excluidos todavía por el experimento, entonces precisamente en dichas latitudes se encuentran las regiones prohibidas de Störmer, donde no puede moverse ninguna partícula con energía cinética como la ya apuntada. Se sigue de aquí que las partículas aceleradas por la variación del campo magnético de las manchas solares normalmente no pueden escaparse del Sol. Sólo en circunstancias excepcionales pueden hacerlo, y esta posibilidad tiene que ver con la existencia del campo local de las manchas y la circunstancia, ya apuntada arriba, de que a distancias suficientemente grandes el campo de un par de manchas es el de un dipolo.

Si la relación entre las magnitudes de los dos dipolos, es decir, del dipolo correspondiente al campo magnético general permanente, que llamaremos "dipolo permanente", y el que corresponde al que pertenece al par de manchas solares,

que llamaremos "dipolo transitorio" es la adecuada, si la orientación relativa de los dos dipolos en el espacio es también la adecuada y si el campo excede de una cierta constante en toda la región afectada, entonces, como lo indicó Cochart, se perfora un túnel a través de la región prohibida y por ese túnel pueden escaparse las partículas ya aceleradas. Es claro que estas tres condiciones no se cumplen sino en casos excepcionales. Así se explica por qué sólo raramente hay un aumento de la radiación cósmica cuando aparecen las manchas solares y esto generalmente acompañando a las grandes erupciones. Normalmente el túnel permanece cerrado en su desembocadura, o bien ni siquiera existe. El problema de determinar los túneles ofrece algunas dificultades matemáticas y no ha sido resuelto sino para el caso más sencillo de dos dipolos.

Una vez salidas del túnel las partículas cargadas se mueven a través del campo magnético solar y luego, una vez llegadas a la esfera de influencia del campo magnético terrestre, se mueven a través de este último. Para poder llegar a un punto dado de la Tierra es preciso que tengan una energía superior a la energía mínima de llegada a ese punto en la dirección de llegada. Como ya se ha dicho, la energía que adquiere un protón por el proceso de aceleración ya descrito arriba es cuando más de 6 Bev. A esto se debe que no puedan llegar sino a latitudes medias y altas, pero no a latitudes cerca del ecuador. A esto se debe que los aumentos de intensidad de la radiación cósmica no se observan en el ecuador o cerca de él. El problema de la integración de las ecuaciones diferenciales del movimiento en el campo de dos dipolos cruzados también presenta graves dificultades analíticas y todavía no ha podido ser completamente resuelto.

Las aceleraciones que experimentan las partículas pesadas (protones y iones) son relativamente bajas. No ocurre así con las ligeras (electrones). Como consecuencia los electrones pierden por radiación electromagnética la mayor parte de su energía durante el período de la aceleración. Adaptando las fórmulas de Schwinger y Pomeranchuk, desarrolladas para la radiación de electrones acelerados por un betatrón, al caso presente, se ve que la mayor parte de la energía radiada se concentra en las regiones de longitud de onda de unos cuantos centímetros y unos cuantos metros de acuerdo con lo observado. También se puede prever, y

determinar experimentalmente, el estado de polarización de la radiación emitida.

Los cálculos de polarización todavía no han sido hechos.

La radiación electromagnética emitida por los electrones pasa libremente a través del campo magnético tanto solar como terrestre y en consecuencia siempre que hay aceleración de electrones por el campo magnético de las manchas solares tiene que aumentar la intensidad de la radiación electromagnética que viene del Sol. En consecuencia, casi siempre que aparecen manchas solares hay aumento de radiación electromagnética, también de acuerdo con los resultados experimentales. No es necesario para ello que esté abierto al exterior el túnel; basta que exista. Solamente en el caso excepcional en que no hay espacio disponible para que puedan moverse los electrones durante el período de aceleración es cuando no hay emisión de radiación electromagnética.