

18



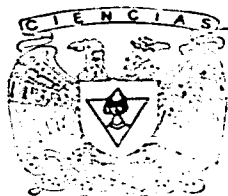
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANALISIS DE LA EMISION DE RAYOS GAMMA Y PARTICULAS ENERGETICAS EN EVENTOS DE MICROONDAS EN EL SOL DURANTE 1991 - 1992

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
FISICO
PRESENTA:

DAVID ADOLFO DIAZ NAVARRO



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

DIRECTOR DE TESIS: DR. ROMAN PEREZ ENRIQUEZ

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

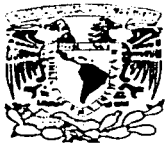


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: David Adolfo
Pérez Navarro
FECHA: 25 - Septiembre - 2002
FIRMA: [Firma]

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA

Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunico a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Análisis de la emisión de rayos gamma y partículas energéticas en eventos de microondas en el Sol durante 1991-1992"

realizado por DIAZ NAVARRO DAVID ADOLFO

con número de cuenta 9052331-1 , quién cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

DR. ROMAN PEREZ ENRIQUEZ

Propietario

DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA

Propietario

DR. JOSE MANUEL HERNANDEZ ALCANTARA

Suplente

DR. ANATOLYI KOTSARENKO

Suplente

DR. ALEJANDRO LARA SANCHEZ

Consejo Departamental de Física

[Firma]

DRA. PATRICIA GOLDSTEIN MENCHES
Coordinadora de Licenciatura

Quiero agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron a la realización del presente trabajo:

Al Dr. Román Pérez Enriquez por su paciencia, dirección y sugerencias.

A los Doctores Blanca Mendoza, José Manuel Hernández, Anatolyi Kotsarenko y Alejandro Lara por su revisión y sugerencias.

A mis hermanos por su apoyo incondicional.

Y por supuesto a Jesucristo por haberme permitido estar en este mundo, y recordar que la palabra de Dios siempre esta presente en nuestras vidas:

Y la lengua es un fuego, un mundo de maldad. La lengua está puesta entre nuestros miembros, y contamina todo el cuerpo, e inflama la rueda de la creación, y ella misma es inflamada por el infierno.

Santiago 3:6

RESUMEN

En el Sol se suscitan una serie de fenómenos como son las ráfagas solares y las eyecciones de masa coronal (EMC) entre otros, y de los cuales emerge una gran cantidad de energía tanto electromagnética como corpuscular. En el Instituto de Geofísica se encuentra un radiointerferómetro llamado RISBP que opera con una frecuencia de 7.7 Ghz ($\lambda=4$ cm), con un ancho de banda de 500 Mhz, y es un instrumento de alta precisión para el estudio de regiones activas en el Sol. En la presente tesis el objetivo central es estudiar 71 eventos en microondas detectados con el RISBP en el periodo de 1991-1992, y determinar las características físicas que hacen que algunos de estos eventos estén relacionados con datos de emisión de rayos gamma, EMC y con la detección de partículas energéticas (SEP) en el medio interplanetario.

La tesis comprende cinco capítulos. En el primer capítulo se da una introducción de lo que es la atmósfera solar y de lo que son algunos fenómenos de la actividad solar. El segundo capítulo se menciona la emisión electromagnética y corpuscular durante fenómenos de corta duración como son las ráfagas solares, protuberancias y EMC. En el tercer capítulo se construyen cuatro tablas (microondas, rayos gamma, EMC y SEP) y se hace un análisis de los datos mediante la estadística al tomar los eventos que consideré están asociados con algún fenómeno solar, y aparentemente no existe una correlación apreciable entre ellos. El cuarto capítulo se dan los resultados que se obtienen. Y en el último capítulo (cinco) se da una explicación del porqué los eventos analizados no presentan una alta correlación; y finalmente, en ese mismo capítulo se dan las conclusiones a las que se llega.

Indice General

1	Introducción	1
1.1	Atmósfera solar	1
1.2	Regiones activas	3
1.2.1	Fenómenos de actividad solar	4
1.2.2	Ráfagas solares	5
1.2.3	Protuberancias	9
1.2.4	Eyecciones de masa coronal (EMC)	15
1.3	Radiación	20
1.3.1	Emisión electromagnética	20
1.3.2	Emisión corpuscular	22
2	Emisión electromagnética y corpuscular durante ráfagas	25
2.1	Emisión de rayos gamma	27
2.1.1	Observación de los rayos gamma	28
2.2	Emisión de rayos-X	29
2.2.1	Clasificación de los rayos-x	29
2.3	Emisión de radio	30
2.3.1	Microondas	32
2.3.2	Ondas métricas	33
2.4	Partículas energéticas	36
2.4.1	Electrones	37
2.4.2	Protones	38
2.5	Microondas de regiones activas solares obtenidas con el radiointerferómetro solar de base pequeña a $\lambda=4$ cm	39
2.5.1	Antenas	40
2.5.2	Compensación de caminos	41
2.5.3	Receptor	44
2.5.4	Modulador de fase	47

3	Análisis de SEP y su relación con rayos gamma, microondas y EMC durante el máximo solar 1991-1992.	51
3.1	Datos de los eventos	51
3.1.1	Microondas	51
3.1.2	Rayos gamma	54
3.1.3	Eyecciones de masa coronal (EMC)	56
3.1.4	Partículas energéticas (SEP)	59
3.2	Eventos asociados	59
4	Resultados	67
5	Discusión y conclusiones	73
5.1	Discusión	73
5.2	Conclusiones	77

Indice de Figuras

1.1	Imagen del Sol en H α tomada desde el satélite SOHO.	4
1.2	De a) a c) la formación de la protuberancia y d) erupción de la protuberancia cuando la formación sobrepasa el valor crítico. Segun Priest y col., 1989.	10
1.3	Espectro electromagnético.	20
2.1	Intensidad de una ráfaga en diferentes longitudes de onda	27
2.2	Modelo idealizado de los fenómenos de radio que acompañan a un destello, como podrían ser expuestos por un espectrógrafo de banda ancha. Los números romanos indican los tipos de emisión.	35
2.3	Radiointerferómetro utilizado en el registro de emisiones de microondas	40
2.4	Esquema del radiointerferómetro	42
2.5	Estructura a bloques del radiointerferómetro	46
2.6	Canal de interferometría	48
3.1	Distribución porcentual de eventos asociados por día con eventos de microondas durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	60
3.2	Distribución porcentual de eventos asociados por día con rayos gamma durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	60
3.3	Distribución porcentual de eventos asociados por día con EMC durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	61
3.4	Distribución porcentual de eventos asociados por día con SEP durante Marzo de 1991 y Mayo de 1992.	62
3.5	Frecuencia por mes de la emisión durante el periodo de observación y su relación con el ciclo solar.	64
3.6	Distribución porcentual de eventos asociados por fecha con cualquier tipo de emisión durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	66
4.1	Distribución porcentual de eventos asociados con SEP.	69
4.2	Distribución porcentual de eventos asociados con microondas.	69
4.3	Distribución porcentual de eventos asociados con gamma.	70
4.4	Distribución porcentual de eventos asociados con EMC.	70
4.5	Distribución porcentual de eventos asociados con cualquier tipo de emisión en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	71

5.1 Tiempo de retraso de emisión corpuscular en relación con la localización del evento. 76

Indice de Tablas

1.1	Clasificación de las ráfagas en $H\alpha$	6
1.2	Propiedades promedio de las EMC de 1979 a 1981, tomada de Howard y col, 1985	18
1.3	Asociación de EMC con ráfagas solares (R), protuberancias eruptivas (P), y protuberancias y ráfagas. (tomadas de Wagner, 1984)	18
3.1	Datos registrados por el RISBP durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	53
3.2	Datos de rayos gamma detectados por el observatorio GRANAT que están dentro del periodo de observación de microondas.	55
3.3	Datos de EMC detectados por el MLSO, durante el periodo de observación de microondas.	58
3.4	Datos de protones detectados por el GOES que están dentro del periodo de observación de microondas.	58
3.5	Frecuencia por mes de los eventos en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	63
3.6	Eventos asociados con cualquier tipo de emisión por fecha en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	65
4.1	Eventos asociados con cualquier tipo de emisión en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.	68

Capítulo 1

Introducción

El Sol desde hace mucho tiempo ha sido un objeto de gran admiración para el ser humano, y por la cercanía que se encuentra con la Tierra es la única estrella en el universo entero en el que el ser humano puede estudiar con relativo detalle los fenómenos que suceden en él. Se ha encontrado mucha información valiosa acerca del comportamiento de la física del Sol y de esta manera compararlo con las demás estrellas del universo. De esta manera nos damos cuenta de que el Sol es como un enorme laboratorio de investigación en el que se cumplen una serie de procesos de una escala imposible en la Tierra. Esta constituido por gases los cuales en condiciones normales serían neutros, excelentes aislantes, y no permiten que las cargas eléctricas se muevan con facilidad, pero del Sol emana una gran cantidad de energía que consigue arrancar electrones de los gases, de modo que quedan en un estado de electrización denominado "ionización". es entonces cuando se convierten en excelentes conductores. A éste gas se le llama plasma, el cual se le puede definir como un gas ionizado en el que, normalmente, existe una distribución uniforme de cargas tanto positivas como negativas, es decir de abundantes iones y electrones libres. Este plasma esta constituido de hidrógeno con aproximadamente 80 %, helio con 19 %, y el 1 % restante por todos los elementos de la tabla periódica. Tiene un radio de 700 000 km. y se encuentra a una distancia de la Tierra de aproximadamente 150 millones de kilómetros

1.1 Atmósfera solar

La estructura física de la atmósfera solar se divide en tres capas, las cuales mencionaré brevemente y son:

1. Fotosfera.- a esta capa también se le llama esfera de luz y es considerada la superficie del Sol, la cual a simple vista se ve muy brillante. Esta capa de gas que rodea por completo al Sol y produce toda la radiación visible, tiene un espesor

aproximado de 1000 km. y una temperatura de 6000 K. En esta superficie aparecen gránulos que son como celdas brillantes rodeadas de líneas oscuras con un tamaño aproximado de 1500 km. y que permanecen unos ocho minutos, después de lo cual desaparecen, cediendo el lugar a otros gránulos. La velocidad de subida de los gases es de 500 m/s y los flujos recorren distancias de 100 km. Esto es muy interesante ya que viene a demostrar que la fotosfera no es una capa gaseosa homogénea, como se creía anteriormente, sino que esta constituida de diferentes formas gaseosas que se hallan en constante movimiento.

En esta parte del Sol es donde se encuentran unas manchas casi negras las cuales son llamadas manchas solares que, a veces son tan grandes en tamaño que se pueden ver a simple vista con ayuda de un vidrio oscuro. Están formadas por una región central llamada umbra, rodeada por otra región filamentosa menos oscura llamada penumbra. En la umbra se tiene típicamente un campo magnético de 2000 a 3000 Gauss (McPherson, Lin, & Kuhn, 1992) que congela el material fotosférico, iones y electrones, impidiéndoles salir de la región del campo magnético, y deteniendo el material caliente que intenta atravesarlo. Tienen temperaturas de aproximadamente 4000 K. por cuya razón parecen oscuras sobre el fondo general que tiene una temperatura de 6000 K. Las dimensiones de las manchas varían mucho y oscilan entre 1000 y 200 000 km de diámetro. Algunas de ellas pueden durar solamente algunas horas o unos días, pero otras pueden durar muchos meses. Las manchas solares de larga vida fueron la primera evidencia de la rotación diferencial del Sol, así como el tiempo que tarda en dar una vuelta completa alrededor del Sol, que en latitudes de ± 30 es de 26.2 días.

El número de manchas solares varía aproximadamente cada 11 años el cual es llamado ciclo de actividad solar.

2. Cromosfera.- a esta capa también se le llama esfera de color y esta ubicada por encima de la fotosfera. No se puede ver a simple vista, pero llega a ser visible durante un eclipse solar total cuando el disco del Sol queda cubierto por la Luna. La cromosfera aparece como un anillo de luz roja rodeando al Sol, con una masa gaseosa relativamente tenue, y es prácticamente transparente a la luz fotosférica, por lo que no es posible observarla en luz blanca, salvo en los momentos de un eclipse total. Su componente principal es el hidrógeno el cual tiene su línea espectral visible más acentuada, la línea $H\alpha$ en la región roja del espectro con una longitud de onda de 6563 Å, es por eso que se utiliza el espectroheliógrafo el cual toma imágenes del Sol solamente en las longitudes de onda donde la cromosfera emite intensamente, una de ellas es precisamente la línea $H\alpha$. Tiene un espesor variable que va de los 1000 a los 8000 km., con una temperatura de aproximadamente 4200 K en la baja cromosfera, es decir en la parte inferior de la cromosfera, y los primeros 300 km. están formados principalmente por átomos neutros de hidrógeno con una densidad de 10^{12} part/cm³, pero después vuelve a

subir rápidamente hasta unos 50 000 K a una altura de 14 000 km. que es donde se considera la altura en que termina la cromosfera. Posteriormente se encuentra la región de transición entre la cromosfera y la corona con una temperatura de 10^6 K y una densidad de 10^9 part/cm³.

3. Corona.- esta es la última capa que rodea al Sol y se encuentra por encima de la fotosfera y cromosfera, y al igual que la cromosfera la corona es visible durante un eclipse solar total y se ve como un halo de color blanco perla que rodea por completo al Sol y se le denomina así por la forma en que su luz parece coronar al Sol. Esta capa de gas esta compuesta de átomos extremadamente ionizados y electrones libres que se mueven a enormes velocidades los cuales dispersan la luz que emite la fotosfera y es por eso que toma el color blanco perla. Tiene una densidad media del orden de 10^8 part/cm³, con una temperatura de un millón de grados. Este calentamiento de la corona es una interrogante que no ha tenido, hasta ahora una respuesta definitiva, pues son variadas las hipótesis que se han formulado. Lo que sí es muy posible es que este calentamiento esta vinculado con los campos magnéticos del Sol.

El límite hasta dónde se extiende la corona solar en el espacio interplanetario continúa siendo una incógnita.

El brillo total de la corona varía de acuerdo al ciclo de actividad solar que es de 11 años y en el cual suceden una serie de fenómenos tales como lo son las ráfagas solares, protuberancias y eyecciones de masa coronal entre otros, y de los cuales hablaré más adelante

1.2 Regiones activas

El Sol aparentemente es una estrella tranquila y quieta, pero no es así, ya que existen en él una serie de fenómenos que todavía el ser humano no comprende con exactitud. En todo el Sol se encuentran campos magnéticos, los cuales se miden por el efecto Zeeman, en la línea *H α* , con un aparato llamado magnetógrafo. Los resultados de los magnetogramas de las regiones magnéticas de toda la superficie del Sol de polaridades positivas y negativas, muestran un complicado patrón, los de mayor intensidad se encuentran en las manchas solares o cerca de ellas.

Las manchas solares son parte de las llamadas "regiones activas", las cuales son ciertas áreas determinadas del Sol que se encuentran en un estado caótico en donde se originan una gran diversidad de fenómenos solares, algunos de ellos transitorios, tales como las manchas, fáculas, protuberancias, eyecciones de masa coronal y ráfagas entre otros. Los fenómenos transitorios vistos en rayos x se ven como puntos brillantes en la superficie solar que aparecen y desaparecen en cuestión de horas .

1.2.1 Fenómenos de actividad solar

Los fenómenos de actividad solar de los cuales hablaré son principalmente las eyecciones de masa coronal, protuberancias y las ráfagas solares. Este último es el fenómeno más violento y energético que ocurre en la atmósfera solar. Este puede definirse como áreas que liberan energía y que se encuentran en la cromosfera solar, sobre todo en las regiones donde existen manchas solares, y son de una naturaleza muy compleja. Otro fenómeno que ocurre en el Sol, son las llamadas protuberancias o prominencias las cuales son las más grandes formaciones que ocurren en la atmósfera del Sol.

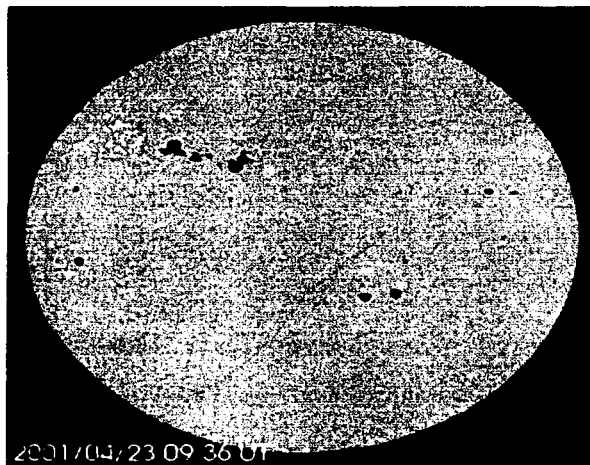


Figura 1.1: Imagen del Sol en Ho tomada desde el satélite SOHO.

En ocasiones (Harrison, 1991) ocurren eyecciones de grandes nubes de material de la corona solar que son lanzadas al espacio interplanetario a gran velocidad. A estos fenómenos se les llama eyecciones de masa coronal o EMC. Mucha de esta energía tanto electromagnética como corpuscular llega aquí la Tierra.

Todos estos fenómenos de actividad solar (excepto las manchas) son considerados de corta duración; la frecuencia e intensidad con que ocurren éstos fenómenos varían en forma más o menos cíclica, siguiendo el período de 11 años, el cual se le llama ciclo de actividad solar.

A continuación daré una síntesis de algunos fenómenos que se presentan en la atmósfera solar.

1.2.2 Ráfagas solares

Hace algunas años se creía que la atmósfera solar estaba compuesta de gas caliente irradiando tranquilamente en el espacio la energía que recibía de su interior. Actualmente ya no es así, pues sabemos que el Sol está constantemente cambiando, ya que las mediciones hechas por los investigadores de la emisión del Sol no son siempre iguales, es decir, no permanece constante, pues tanto la fotosfera como la cromosfera se hallan en un estado turbulento.

Uno de los acontecimientos más catastróficos en el Sol que involucra a muchas ramas de la física, son las llamadas ráfagas solares las cuales se pueden definir como explosiones que liberan una gran cantidad de energía, y que ocurren en la cromosfera solar, sobre todo en las regiones donde existen manchas solares; son de una naturaleza muy compleja y pueden emitir hasta 10^{32} ergs de energía en forma de emisión electromagnética y partículas energéticas (ver capítulo siguiente), en un tiempo corto de tan sólo 10^2 segundos, con una velocidad que puede alcanzar unos 1000 km/s. Son observadas mejor en la luz de la línea α del hidrógeno ($H\alpha$).

La característica más sobresaliente es el repentino relámpago de radiación que ocurre poco tiempo después del comienzo. Las ráfagas más intensas, localizadas en regiones activas cerca de intensos y complejos campos magnéticos, emiten luz blanca, visible durante algunos minutos. Es algo muy importante la presencia de luz blanca, pues ha permitido ver, a través de un telescopio ordinario, algunas de las ráfagas más intensas cuando algunos investigadores o simplemente persona aficionadas a este tipo de fenómenos observa en esos momentos el Sol.

Algunas de las ráfagas más rápidas, en menos de un minuto comienzan a propagarse a lo largo de una región del Sol, y tienen una extensión espacial característica de 10^4 a 10^5 km; lo que significa que una región de la cromosfera de centenares de kilómetros cuadrados de extensión, puede aumentar su radiación aproximadamente 10 veces en ese corto tiempo. Aproximadamente el área de una explosión típica es de 10^{15} m^2 , y la densidad de partículas es de 5×10^{14} a 5×10^{15} por metro cúbico con una temperatura en su interior de 2.5×10^6 k. De acuerdo a estudios realizados, las ráfagas pueden durar desde algunos minutos hasta varias horas. Siempre aparecen cerca de las manchas solares, y son más frecuentes en las regiones centrales de los grupos, y son más escasas a distancias crecientes; más allá de 100000 km de una mancha son vistas rara vez. Aunque la aparición de una ráfaga no puede conocerse con exactitud, la probabilidad

de que aparezca asociada a manchas solares es mayor que en cualquier otro sitio del Sol. En los periodos del máximo de actividad solar, ocurren pequeñas ráfagas solares varias veces por día y más de una ráfaga por mes.

Se ha encontrado que la energía total liberada en una ráfaga (Svestka, 1976; Sturrock et al, 1980) puede estar de 10^{21} a 10^{25} J.

Clasificación de las ráfagas

Para clasificar a las ráfagas en la región visible del espectro se hallan las líneas de emisión del hidrógeno en la serie Balmer $H\alpha$ a 6563 Å.

Su importancia está clasificada de acuerdo a la escala visual observada durante la máxima brillantez del evento desde la clase menor S (subráfaga o ráfaga pequeña) a la clase 3 (mayor), y la categoría 4 que son aquellas ráfagas que ocurren rara vez de acuerdo a su extensión e intensidad. La intensidad de la línea $H\alpha$ durante una ráfaga de clase 4 sube 10 veces respecto al estado normal que es cerca de 1Å, y el grosor de la línea $H\alpha$ en ocasiones alcanza los 15Å. Por lo general, estas ráfagas ocurren en el periodo del máximo de actividad solar. En la tabla 1.1 se muestran algunas de sus características.

Existen básicamente dos tipos de ráfagas (Sturrock, 1979) que son: ráfagas compactas o de arco simple, la mayoría de las subráfagas son de este tipo. Las subráfagas son ráfagas pequeñas en las que aumenta el brillo en rayos x de un solo tubo de flujo o arco magnético. Puede ocurrir el evento cerca de una mancha simple, donde el exceso de energía almacenada es poco. En este tipo de ráfagas su tamaño, por lo general, es de 30" de arco. El otro tipo de ráfagas es el de doble cinta llamadas también ráfagas dinámicas. Todas las ráfagas grandes son de este tipo, su tamaño por lo general rebasa los 80" de arco y se presentan casi siempre cerca de las protuberancias (que hablaré más adelante de ellas).

Clase	duración promedio(min)	Extención del área en millonésimas del hemisferio solar
S	6	< 100
1	17	100-300
2	29	300-750
3	62	750-1200
4	180	> 1200

Tabla 1.1: Clasificación de las ráfagas en $H\alpha$.

Cuando una ráfaga es más brillante, se empiezan a ver como material que se parecen a las protuberancias, sólo que más intensas, que abandonan la cromosfera. Por lo

general, este gas tiene velocidades externas de alrededor de 500 km/seg y pueden ser medidas por los desplazamientos Doppler de las líneas espectrales. Es decir, las ráfagas solares no sólo emiten luz, sino también arrojan al espacio interplanetario grandes cantidades de materia del Sol. En ocasiones este material arrojado regresa al Sol, pero es más frecuente que se vuelva invisible mientras que se encuentra aún en el espacio coronal, y por lo tanto ya no se puede seguir su estudio. De cualquier manera, se cree que la materia que se aleja esta formada de átomos ionizados que abandonan el Sol.

Indudablemente, una ráfaga puede actuar como un acelerador gigante de partículas, pero las causas de la aceleración es uno de los problemas fundamentales de la física de ráfagas solares.

Mecanismos

Es un hecho que la mayoría de los mecanismos por los cuales ocurre una ráfaga están asociados los campos magnéticos solares. Cuando ocurre una ráfaga, la energía producida obliga de algún modo a que innumerables partículas cargadas eléctricamente sean disparadas desde el Sol hacia el espacio interplanetario, así mismo también se produce emisión electromagnética como lo veremos más adelante.

Existen varios mecanismos por los cuales se puede producir la aceleración de partículas en ráfagas (Melrose, 1994), y es muy difícil aceptar uno sólo ya que la ráfaga es un fenómeno muy complejo y por tanto no existe un modelo aceptado generalmente que pueda explicar el comportamiento observado de ella.

Para que las partículas energéticas logren dejar al Sol para siempre, debe de estar presente (Ellison, 1991) un mecanismo que las acelere. A continuación veremos algunos mecanismos o modelos los cuales nos dará una idea de cómo se producen las ráfagas solares.

• Descarga

Una de las primeras hipótesis para explicar las ráfaga solares fue propuesta en la década de los cuarentas. Estaba basada en el hecho de que la cromosfera solar contiene abundancia de electrones libres, lo cual implica que la cromosfera es buena conductora de electricidad. En la vecindad de una mancha solar, el campo magnético esta cambiando con rapidez, es decir es un campo magnético variable el cual genera un campo eléctrico, lo cual quiere decir que produce fuerzas electromotrices en sus cercanías. Los iones y electrones comenzarán a fluir a lo largo de ciertas trayectorias alrededor de la mancha y las partículas más ligeras como son los electrones, rápidamente se aceleraran y tendrán grandes velocidades tan pronto como adquieran energía del campo más rápidamente que la que pierden por choques, y los átomos golpeados por estos electrones fugitivos

ganaran energía suficiente para hacerlos irradiar. Por eso es que la ráfaga es como una "descarga" generada por el campo magnético variable, y por lo tanto es un fenómeno esencialmente electromagnético. Pero este modelo "primitivo" solamente daba explicaciones plausibles de algunas características observadas tales como el comienzo repentino, la cercanía de las manchas solares y su asociación con las regiones centrales de manchas complejas magnéticas. Pero no explica la expulsión de corrientes de partículas energéticas ni la propagación de emisión de ondas de radio.

- **Capas dobles**

Años después, Alfvén y Carlquist (1967) propusieron un modelo de ráfaga basado en la interrupción de corriente que tiene lugar en cierto punto de un circuito eléctrico inductivo, de tal forma que la energía magnética completa del circuito tiende a dispersarse en el punto. Sugirieron que la interrupción de corriente tiene lugar en una región localizada de espacio-carga llamada capa doble (Borovsky, 1983).

Las capas doble son dos capas de carga igual y opuesta, las cuales son paralelas y no necesariamente planas, es decir, son estructuras electrostáticas parecidas a los choques en las que una caída de potencial grande se concentra en una región pequeña. Se crea un campo eléctrico muy fuerte dentro de la capa doble, pero el plasma fuera de la capa no es alterado.

Una de las propiedades que se debe satisfacer para que ocurra la capa doble, es que el campo eléctrico debe ser mucho más fuerte dentro de la doble capa que fuera para que se pueda producir la ráfaga.

- **Campos magnéticos "Enrollados"**

Muchos científicos que estudian ráfagas, han considerado el almacenamiento de energía libre en campos magnéticos enrollados, es decir, corrientes libres de fuerzas paralelas al campo magnético. El enrollamiento y la corriente serán formados por la convección fotosférica con componentes rotatorios. La rotación diferencial puede ser la causa del rompimiento de los campos magnéticos que soportan filamentos. Un posible escenario para la liberación de energía en la ráfaga, es la interacción de los arcos en la región activa resultando en la reconexión de los campos magnéticos y la conversión de energía magnética a energía cinética y calorífica (Mandrini et al., 1995). Este tipo de almacenamiento fue considerado por Sturrock y Coppi (1966). En el caso de ráfagas de larga duración (varias horas), el proceso de la aceleración de partículas durante la reconexión de líneas de campo magnético se presenta en la parte de arriba del arco que se forma cuando se produce la ráfaga (Akimov et al., 1996).

Los modelos mencionados anteriormente por los cuales se produce una ráfaga no están aceptados universalmente, ya que no se puede decir con certeza que existe solamente un proceso de aceleración de partículas el cual pueda, por sí mismo, explicar todos los fenómenos relacionados con las partículas energéticas observadas en el espacio interplanetario. La aceleración de partículas en ráfagas solares es aún muy incierta y confusa pues es un proceso físico muy complejo, y no existe un mecanismo que acepte en general.

1.2.3 Protuberancias

En la atmósfera del Sol existe un fenómeno en el cual se lleva a cabo un suceso entre la cromosfera y la corona, es el proceso de las llamadas "protuberancias o prominencias", que son las formaciones más grandes que suceden en la atmósfera solar. Sus aspectos son variables, pueden ser de grandes nubes de gas caliente, o también de arcos, árboles, nubes, etc. generalmente de hidrógeno y helio, y son alargadas y planas y se proyectan en los bordes del disco solar a centenares de miles de kilómetros por encima de la fotosfera y, por lo general perpendiculares a la superficie del Sol. Las partes inferiores de las protuberancias nacen en la cromosfera, y las partes superiores se extienden muchos miles de kilómetros dentro de la corona solar.

Las protuberancias son gases que no se encuentran en equilibrio hidrostático pues son más densas que la materia de alrededor, aproximadamente de 100 a 1000 veces y con temperaturas de 10000 a 20000 K. con un campo magnético de aproximadamente de 20 a 250 Gauss. La luminosidad de las protuberancias proviene de sus átomos, los cuales absorben la luz de la superficie solar y luego la emiten de nuevo en longitudes de onda discretas. A veces, las protuberancias alcanzan alturas de aproximadamente 50000 kilómetros sobre la superficie del Sol, pero a veces alcanzan grandes alturas, de hasta un millón de kilómetros, lo que significa aproximadamente un radio solar, y pueden durar en ocasiones, hasta por varios meses. Suelen observarse lejos de los centros de actividad solar (manchas solares), es decir se observan en latitudes tanto bajas como altas.

Las protuberancias son más grandes y más numerosas en zonas de alta latitud y, aproximadamente aparecen tres años antes del máximo de las manchas solares. Las protuberancias que se encuentran cerca de los centros de actividad solar (manchas solares), cumplen un ciclo de 11 años bien definido, y el máximo de protuberancias coincide con el máximo de las manchas solares.

En ocasiones las protuberancias ascienden de la cromosfera y se difunden progresivamente en la corona hasta desaparecer, a este fenómeno se le conoce como disolución lenta. Pero a veces, ascienden y se curvan dirigiéndose de nuevo hacia la superficie de Sol, describiendo arcos grandes y pequeños, esto depende de la violencia de la protuberancia y también del ángulo que la protuberancia forma con la superficie del Sol durante su comienzo.

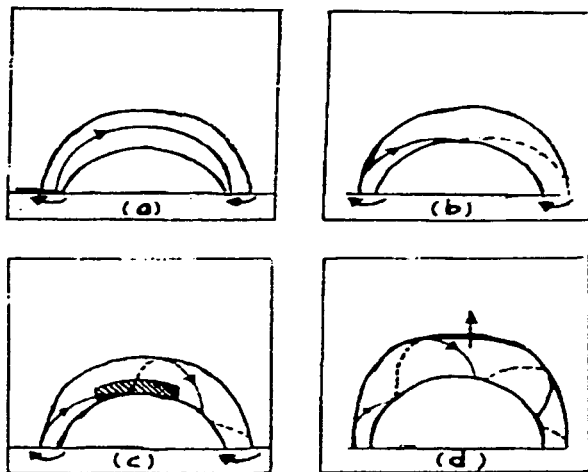


Figura 1.2: De a) a c) la formación de la protuberancia y d) erupción de la protuberancia cuando la formación sobrepasa el valor crítico. Según Priest y col., 1989.

En numerosas ocasiones, se observa que el movimiento es de una protuberancia a otra, en dirección generalmente paralela a la superficie solar. Una característica importante del movimiento descendente de los nudos y chorros de gas de las protuberancias, es que están dirigidos hacia una o varias áreas relativamente pequeñas, que son como un centro de atracción.

Existen algunas teorías sobre cómo es que se producen las protuberancias, una de ellas dice que estos fenómenos se originan como se muestra en la siguiente figura 1.2, según Priest y col. (1989). La protuberancia es inicialmente un tubo de flujo gigantesco sin torcimiento, pero posteriormente el campo magnético comienza a torcerse debido a

la inestabilidad que se presenta en la atmósfera solar, de esta manera se produce una protuberancia.

Las causas de las protuberancias no es muy conocido aun, pero se sigue investigando estos fenómenos solares. Y a igual que en las ráfagas solares, no se tiene un mecanismo que tenga una aceptación general ya que este tipo de fenómenos son de una naturaleza muy compleja.

Clasificación de las Protuberancias

El movimiento de materia en las protuberancias aparentemente es muy complicado para su estudio. Muchos tipos de protuberancias han sido descubiertos conforme se investiga y se observa con instrumentos más precisos al Sol. Los más importantes a mi parecer, son tres, y la gran mayoría de las protuberancias observadas se encuentra en uno de estos tres tipos, los cuales a continuación mencionaré y explicaré brevemente:

1. Protuberancias eruptivas.

Este tipo de movimientos son los más característicos que se ven, y es importante saber que la masa perdida por el Sol en una protuberancia eruptiva es de aproximadamente de 2×10^{12} kg y la energía involucrada es de unos 10^{30} ergs (Ballester y Kléczek, 1985).

Al inicio este tipo de protuberancias permanecen inalterables durante horas y en ocasiones días enteros, a tal grado que parecen inmóviles. Los cambios en los movimientos comienzan con movimientos rápidos que por lo general aparecen en la base de las protuberancias.

Estas protuberancias eruptivas se desarrollan con bastante rapidez, a tal grado que a veces duran solo 10 minutos. La principal característica es que primero comienzan a elevarse con lentitud, después lo hace cada vez con mayor rapidez. Las partes separadas se mueven casi uniformemente, pero de pronto se acelera muy rápidamente y al producirse la aceleración, el brillo aumenta para luego desvanecerse.

Estas protuberancias se mueven rápidamente hacia afuera del disco solar, y en ocasiones se elevan a alturas de un diámetro solar. Cuando alcanzan alturas grandes, las velocidades varían de, aproximadamente 50 km/seg a un máximo de 728 km/seg (Pettit, 1913), y la magnitud del campo magnético es de hasta 250 Gauss. Y cuando alcanzan estas alturas, los nudos y los chorros comienzan a separarse de las protuberancias y regresan a la superficie solar cayendo casi verticalmente arrojando su material tan violentamente, que se dice que es arrancado

de raíz, ya que casi no deja rastro en el lugar de la explosión. En promedio, la vida de una protuberancia eruptiva es de 30 minutos.

Eventualmente muchas de estas protuberancias estallan directamente dentro del espacio expulsando a través de la corona una eyección de masa coronal (Hundhausen, 1994; Low, 1990) y la masa del material expelido, se va desvaneciendo sin señal visible alguna de retorno. No se puede estar seguro de si este material es atrapado en la corona o si sale al espacio exterior. Algunas protuberancias eruptivas observadas, tienen velocidades mayores que la velocidad parabólica (617 km/seg en la superficie solar), que es aproximadamente a la altura de un radio solar de 450 km/seg, por lo que esto ocasiona que el material de estas protuberancias pueda dejar para siempre el Sol. Smith y Priest (1979) estudiaron el proceso de formación de las protuberancias con base en las ecuaciones básicas de la magnetohidrodinámica. La formación de las estructuras magnéticas es el resultado de la influencia de las fuerzas magnéticas y del gradiente de presión térmica en la corona:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g} - \nabla P \quad (1.1)$$

donde ρ es la densidad, v la velocidad, \mathbf{J} la densidad de corriente, \mathbf{B} el campo magnético, \mathbf{g} la aceleración de la gravedad y P la presión térmica.

Como la velocidad del plasma en las protuberancias es mucho menor que la velocidad de las ondas magnetohidrodinámicas, esto hace suponer que las fuerzas de gravedad, magnética y el gradiente de presión térmica, están en equilibrio, entonces

$$0 = \rho \mathbf{g} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} - \nabla P \quad (1.2)$$

Como $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = \mathbf{F}$ es perpendicular a la dirección de \mathbf{B} , entonces a lo largo de las líneas magnéticas la materia de una protuberancia está en equilibrio hidrostático, es decir:

$$0 = \rho \mathbf{g} - \nabla P \quad (1.3)$$

Entonces

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

donde la fuerza de gravedad está actuando en la dirección opuesta al eje Z .

Kippenhahn y Schlüter (1957) desarrollaron el modelo para la materia de la protuberancia que está sostenida por el campo magnético, donde las componentes,

horizontal, del balance de las fuerzas es

$$P + \frac{B^2}{2\mu} = cte \quad (1.4)$$

y vertical (contra la gravedad)

$$\rho g = \left[\frac{dB_z}{dx} \right] \left[\frac{B_z}{\mu} \right] \quad (1.5)$$

donde μ es la permeabilidad magnética.

Las protuberancias eruptivas no son muy frecuentes, y un detalle importante es que cuando explotan, los centros de investigación con radiotelescopios los cuales se encuentran en diferentes puntos de la Tierra, registran emisiones de radio del Sol.

2. Protuberancias cerca de manchas solares.

Este tipo de protuberancias surgen en la vecindad de grupos de manchas solares. En ocasiones, aparecen aún antes de que se forme una mancha o una fábula en esta zona, y en otras ocasiones las protuberancias aparecen después de que desaparecieron las manchas. Una de las características más importantes de estas protuberancias, son que los movimientos de materia parecen "condensarse", empujando a ser visibles en la corona sobre una mancha solar, y las trayectorias se asemejan mucho a las líneas de fuerza de un campo magnético y da la impresión de que las masas de gases de las protuberancias sólo se pueden mover sobre líneas muy definidas, en los que toman la forma de angostos chorros luminosos. En ocasiones, los chorros luminosos o burbujas aisladas de una protuberancia siguen trayectorias curvas, de una nube a la superficie solar. Es mucho más probable observar movimientos hacia la superficie desde nubes que están flotando en el Sol (son las llamadas nubes coronales). En ocasiones estos chorros luminosos o burbujas no se originan en una nube, sino que se aparecen en la corona, apareciendo como un punto débil que, al aproximarse a la superficie solar, destellan. Este movimiento curvo casi en toda la trayectoria es uniforme, en cualquier dirección de la superficie solar.

Las velocidades de este tipo de protuberancias comparadas con la de las protuberancias eruptivas, son mucho menores, y están en el intervalo de aproximadamente, 50 km/seg a 300km/seg. Con frecuencia se observa que un chorro de material altamente luminoso asciende siguiendo una trayectoria casi vertical y algunas veces se curva, y llega a alturas de hasta 100 000 km. o más, luego se detiene y retrocede frecuentemente a lo largo de la misma trayectoria. Este tipo de fenómenos

se conoce como protuberancias con retroceso y son de dimensiones variadas las cuales van de 10 000 km. a los 100 000 km.

Existen dos tipos de fuerzas mecánicas que son capaces de controlar los movimientos de los gases cerca de la superficie solar que son: la gravitación y la presión de la radiación. La fuerza de gravitación es una fuerza que actúa verticalmente hacia abajo (hacia la superficie solar), y por tanto su papel no puede ser decisivo en el movimiento de los protuberancias. La presión de la radiación sobre los átomos de gas que se encuentran en la superficie solar es una fuerza que actúa verticalmente hacia arriba y no interviene en el movimiento de las protuberancias que se han mencionado. Se podría pensar que estas dos fuerzas deberían producir la aceleración de los movimientos en las protuberancias, pero sólo la electrodinámica es capaz de dar la respuesta al movimiento uniforme en una trayectoria curvilínea por ejemplo electrones en un campo magnético. Los cálculos han confirmado que este fenómeno no puede ser explicado como resultado de la acción de la fuerza gravitacional y la presión de la radiación, y como en el desarrollo de estas protuberancias, en muchos casos van acompañadas de radioemisión, entonces este fenómeno es de naturaleza electromagnética.

3. Protuberancias caóticas.

Por último, la siguiente clasificación son las protuberancias de clase 3, en las cuales los cambios que se dan en estas protuberancias son caóticos, es decir, son movimientos que se realizan al azar de filamentos y chorros individuales, y también en los cambios en la forma general de las protuberancias. Estos cambios de este tipo de fenómenos se parecen mucho a los cambios que se producen en las nubes que vemos aquí en la Tierra producidos por las corrientes de aire. Al observarlas detenidamente parecen desaparecer y posteriormente aparecen con una nueva forma, diferente claro a la forma anterior. Estas protuberancias suelen llegar a tener alturas que llegan aproximadamente a los 150 000 kilómetros, y si se observan los movimientos que se producen en las nubes individuales de estas protuberancias, se notará que los cambios se realizan a velocidades muy lentas, aproximadamente de 10 km/seg.

Este tipo de protuberancias proyectadas en el disco solar aparecen como filamentos que por tener velocidades lentas, a veces se mantienen durante varias rotaciones del Sol. Ahora bien, como tienen movimientos que se dan al azar, las líneas magnéticas de las fuerzas inducidas por el movimiento del gas ionizado quedará como "congelado" en el gas en movimiento y entonces participará de estos mismos movimientos al azar y las líneas de fuerza del campo magnético se enredan. Es por eso que en este tipo de protuberancias la estructura magnética es muy compleja pues aún se esta muy lejos de comprender el mecanismo de acción de los campos magnéticos sobre los movimientos al azar.

1.2.4 Eyecciones de masa coronal (EMC)

Anteriormente las personas que estudiaban el Sol no conocían el papel que desempeña la corona solar durante eventos explosivos o eruptivos tales como las ráfagas solares y las protuberancias las cuales ya se ha mencionado anteriormente, debido a las dificultades que se tenían para observar la corona solar.

En la década de los setentas se pudo establecer la existencia de grandes nubes de miles de millones de toneladas que eran emitidas por el Sol. Posteriormente los coronógrafos, mostraban que las ráfagas algunas veces, están asociadas con enormes volúmenes de plasma que salen al espacio interplanetario (Wagner, 1984). Estas eyecciones de masa transitorios desde la corona solar, denominadas "eyecciones de masa coronal" (EMC).

Las eyecciones de masa coronal son fenómenos repentinas de grandes nubes densas de plasma magnetizado desde la atmósfera exterior del Sol. Algunos investigadores han observado que las EMC se originan al comienzo de las explosiones de rayos x (Harrison et al., 1990). Estos fenómenos fueron observados por primera vez por vehículos espaciales tales como el Orbiting Solar Observatory (OSO-7) por medio de coronógrafos de luz blanca en 1971 (Tousey, 1973); y posteriormente, el coronógrafo Skylab operando durante 1973-1974 registrando 77 eventos (Munro y Sime, 1985); el coronógrafo Solwind sobre el satélite P-78 durante 1979-1985 obteniendo 1200 EMC (Sheeley et al. 1980). El siguiente es el coronógrafo polarímetro (c/p) del satélite solar Maximum Mission (SMM). Y posteriormente el espectrógrafo de gran angular (LASCO) a bordo del vehículo espacial SOHO (Observatorio Solar y Heliosférico) que fue lanzado en 1995 gracias a la NASA y a la Agencia Espacial Europea. El SOHO se encuentra aproximadamente a 1.5 millones de kilómetros de la Tierra en dirección al Sol, y cuenta con numerosos detectores y telescopios para un monitoreo continuo del Sol.

Los coronógrafos orbitando individualmente observaron diferentes partes de la corona solar, la mínima observación fue hecha por el coronógrafo polarímetro SMM a una distancia de $1.6 R_s$ (radio solar) y la máxima de $10 R_s$, hecha por el Solwind. Posteriormente se hicieron otras observaciones con el coronómetro -K que observó la corona solar desde $1.2 R_s$, hasta $2 R_s$.

Clasificación de las EMC

Con las imágenes de 998 EMC tomadas entre el 28 de Marzo de 1979 y el 31 de Diciembre de 1981 con el coronógrafo de luz blanca Solwind en el satélite P78-1 del programa de Prueba Espacial de la Fuerza Aérea Estadounidense, Howard y col (1985) hicieron una clasificación de ellas en 10 tipos estructurales diferentes, nueve de éstos se describen a continuación, el décimo tipo se reserva para aquellos eventos que tienen

una forma que no se puede definir observacionalmente.

1. Arcos.- son de estructuras curvilíneas con dos piernas y orilla conductora y seguidoras claramente definidas.
2. Frente curvo.- es una región llena de emisión cuya orilla conductora no tiene una orilla seguidora obvia. Las orillas conductoras son curvas las cuales unen dos piernas curvas que se expanden lateralmente conforme se propagan hacia afuera.
3. Halos.- esta incluye material solar que rodea al disco de ocultación del coronógrafo y se propaga aproximándose o alejándose del observador. La energía liberada es de aproximadamente 10^{31} erg.
4. Picos.- son chorros estrechos de material que en ocasiones se mueve hacia afuera, a lo largo de cascos coronales. La energía liberada es de aproximadamente 10^{30} erg.
5. Picos dobles.- tienen piernas rectas que se mueven radialmente hacia afuera con la misma rapidez pero no están unidas por un material perceptible en luz blanca. Estas EMC son especialmente comunes por encima de $3R_s$.
6. Picos múltiples.- se les llama picos múltiples porque son EMC, con más de dos picos.
7. Explosiones de casco.- este tipo de EMC ocurren en dos fases, en la primera fase, un casco existente se abrillanta y tal vez se ensancha un poco durante un período de algunas horas y hasta unos días. En las imágenes se observa que el material es lanzado a lo largo del casco. En la segunda fase se observa que el material es lanzado a cada lado del casco y entonces el casco se desvanece en unas cuantas horas o menos.
8. Abanicos.- casi no tienen estructura interna, la orilla conductora está mal definida y los extremos laterales son rectos.
9. Complejas.- las EMC complejas son eventos en cuya forma no se puede definir en términos de las otras formas simples, ya que tienen características no usuales. Este tipo de EMC con curvatura en la orilla conductora son raras.

De la clasificación de las EMC que se acaba de mencionar, existe la posibilidad de que la forma estructural de las EMC varíe al desplazarse a través de la corona solar, sin embargo en general puede asignársele alguna de estas clases mencionadas para poder realizar estudios estadísticos más confiables.

Características de las EMC

Algunas de las características más importantes de las eyecciones de masa coronal se han obtenido gracias a los satélites espaciales, que con los instrumentos que llevan a bordo se pueden calcular su longitud, su velocidad, entre otros. Por ejemplo en la corona baja, de aproximadamente $1.2R_s$, las EMC empiezan a verse con el coronógrafo K y de 1.2 a $2.2 R_s$ las velocidades radial y lateral son comparables, pero la expansión lateral cesa pronto. También el ancho y la altura son comparables. Posteriormente se aceleran y aumentan su altitud, y a veces aproximadamente a $1.8 R_s$, en las EMC se desarrollan unas piernas brillantes desde abajo hacia arriba en las orillas de la cavidad hasta que se forma un arco completo. En la corona alta, después de haber alcanzado una velocidad constante (Sawyer et al., 1984), la parte superior del arco tiende a desplazarse, dejando dos densas piernas exteriores brillantes. Estas EMC son clasificadas de doble pico.

Con las fotografías tomadas a diferentes tiempos con coronógrafos, se ha podido calcular la velocidad de estas eyecciones de masa y se ha encontrado que existen EMC con velocidades de 50 km/seg, las cuales se consideran lentas y también hay EMC rápidas de aproximadamente 2000 km/seg, y que es muy probable que puedan alcanzar velocidades mayores a esta.

De acuerdo a las imágenes en $H\alpha$ del coronómetro polarímetro (c/p) del SMM y del Skylab que se encontraban orbitando la Tierra, se ha llegado a las conclusiones de que la mayoría del exceso de masa encontrado en las EMC es de origen coronal (Webb y Hundhausen, 1987). Durante una EMC la cantidad de material coronal perdido se ha calculado que tiene aproximadamente, un valor promedio de 4.1×10^{12} kg (Howar y col, 1985). También, ocurren con una mayor frecuencia durante el máximo de actividad solar, con un rango en promedio de aproximadamente 2 EMC por día, y durante el mínimo de actividad solar se ven 6 EMC pequeñas por día (Shreeley et al., 1985; Howard et al., 1985). La energía cinética, la cual se calculo usando la velocidad de la orilla conductora, tiene un valor promedio de 3.5×10^{30} ergs.

Se han elaborado muchos estudios respecto de las eyecciones de masa coronal, entre los que más destacan se encuentran los estudios realizados por Howard y col., que han estudiado estos fenómenos solares durante mucho tiempo y que han servido para poder comprender un poco más estos fenómenos. Con los registros que obtuvieron (Howard y col, 1985) elaboraron la tabla 1.2 en donde se muestran algunas propiedades de este tipo de fenómenos.

Estas características de las eyecciones de masa coronal tales como su velocidad, latitud central, masa total y energía cinética durante el máximo de actividad solar al mínimo, siguen siendo estudiadas por diversos investigadores y se espera que muy pronto se puedan comprender con mayor detalle, ya que son un fenómeno que afecta directamente a la Tierra y es muy importantes para los seres humanos conocerlos con cierto detalle.

forma	%del total	vel (km/s)	Extensión (grad)	Masa (10^{15} g)	E.C. (10^{30} erg)
pico	22	297	15	0.93	0.44
Doble pico	12	425	30	2.6	2.4
pico multiple	19	425	45	3.5	1.9
Frente curvo	15	584	62	8.4	6.4
Arco	1	530	44	4.7	3.7
Halo	2	630	309	21	18
Compleja	5	592	65	7.2	5.7
Explosión de casco	5	200	44	5.4	0.56
Abanico difuso	10	377	33	1.7	0.60
Otras	9	483	59	4.4	3.4
Todas	100	472	45	4.1	3.5

Tabla 1.2: Propiedades promedio de las EMC de 1979 a 1981, tomada de Howard y col, 1985

Asociación de las EMC con otros fenómenos solares

Se ha tratado de asociar las EMC con otros fenómenos de actividad solar como ráfagas o protuberancias por ejemplo, para poder conocer si son generadas por un mismo fenómeno o no.

Por lo general las eyecciones de masa coronal están asociadas con otro tipo de fenómenos solares, unos pueden ser producidos por las EMC, pero otros están relacionados con su origen, y otros ni siquiera tienen algo que ver con estos fenómenos, pero en especial, las ráfagas solares y las protuberancias eruptivas están, muy estrechamente relacionados con las eyecciones de masa coronal.

Mínimo	0.74 EMC/día ATM WLCE 1973-74	R 10%	PR 8%	P 34%	NADA 48%
Máximo	0.90 EMC/día SMM c/p 1980	R 17%	PR 23%	P 30%	NADA 30%

Tabla 1.3: Asociación de EMC con ráfagas solares (R), protuberancias eruptivas (P), y protuberancias y ráfagas. (tomadas de Wagner, 1984)

Algunos investigadores han encontrado evidencia de que cuando ocurre una EMC, inmediatamente después ocurre una ráfaga solar, y viceversa, pero no existe una prueba fundamental que pueda demostrar que las EMC generen las ráfagas, y viceversa.

Estudios realizados con coronógrafos han llegado a la conclusión de que las EMC y los filamentos o prominencias eruptivas tienen un movimiento relativo hacia arriba (Wagner 1983; Illing and Hundnausen 1986). El principal resultado es que las EMC y las prominencias comienzan sus movimientos hacia arriba aproximadamente al mismo tiempo, aunque la velocidad de la EMC excede a la de la protuberancia eruptiva. Durante una protuberancia, el material que forma a la protuberancia se va calentando conforme se mueve hacia afuera, y más allá de $10R$, es muy difícil distinguir este material, sin embargo en algunos casos existe y el material eyectado no tiene la temperatura coronal que es de un millón de grados. El material coronal viaja adelante de la protuberancia, y por lo general aparece una EMC de tipo arco o frente curvo. Con los datos del Skylab, de 1973-1974 (época de mínimo de actividad solar) se observó un valor promedio de 0.75 EMC por día, y el SMM en el intervalo de Abril a Septiembre de 1980 se observó 0.9 EMC por día. Estos datos que obtuvieron, Wagner (1984) pudo asociarlos con fenómenos solares tales como las ráfagas y las protuberancias eruptivas, las cuales se plasman en la tabla 1.3.

Actualmente científicos de la Universidad Católica de América, en Washington, y del Goddard Space Flight Center de la NASA, en Greenbelt, ambos de los Estados Unidos, han desarrollado un modelo que predice el tiempo que le toma a las EMC en atravesar el espacio que las separa de la Tierra, basándose en la velocidad inicial con la que son expulsadas de la superficie del Sol, así como de su interacción con el viento solar y solamente las que viajan en dirección a la Tierra son peligrosas para los sistemas de telecomunicaciones. Calcular el momento de su llegada es difícil, ya que varía la velocidad a la que viaja por el espacio interplanetario, debido a que estas EMC interactúan con el viento solar. Este nuevo modelo predice con gran exactitud el tiempo de llegada de las EMC a la Tierra, y actualmente pueden ser detectadas en un lapso de medio día, esto significa un gran avance sobre los estudios de las EMC, ya que anteriormente las predicciones que se realizaban se detectaban entre dos y cinco días. No se sabe con certeza lo que ocurre después de una EMC: se cree que después de que ocurre una EMC, la estructura posterior toma la forma de estrias radiales, las cuales se han detectado en el máximo solar y de 3 a 4 días de duración. Algunos autores piensan que existe un posible evento de reconexión magnética mucho después de una EMC, en la cual las líneas de campo son barridas hacia afuera, de tal manera que estas líneas se reconectan. Estudios más detallados deben de realizarse para poder confirmar cualquier teoría de como termina una EMC; lo que si es seguro es que la frecuencia con que ocurren las EMC es mayor cuando se esta cerca del período de actividad solar. Las EMC generan grandes tormentas geomagnéticas que afectan las telecomunicaciones y poderlas predecir será de gran importancia y beneficio para las personas que operan este tipo de sistemas.

1.3 Radiación

Existen dos tipos de radiación, una es la radiación electromagnética y la otra la radiación corpuscular. Empezaré a describir brevemente la primera radiación mencionada y posteriormente la segunda.

1.3.1 Emisión electromagnética

Las ondas electromagnéticas fueron previstas antes de ser descubiertas. Las ecuaciones de Maxwell que describían los campos magnéticos preveían también la existencia de radiaciones, de la misma naturaleza que la de la luz, y que se propagaban en el espacio con una velocidad de 300 000 kilómetros por segundo.

Las ecuaciones de Maxwell fueron presentadas en 1865, pero solamente en el año de 1887 Hertz consiguió comprobar la existencia de ondas electromagnéticas según las ya previstas, produciéndolas en su laboratorio.

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o longitudes de onda. La clasificación habitual del espectro electromagnético es la siguiente:

Longitud de onda (metros)																		
10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5
Rayos gamma		Rayos x		Ultravioleta			visible	Infrarrojo		Microondas			Radiofrecuencia					
10^{21}	10^{20}	10^{19}	10^{18}	10^{17}	10^{16}	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^9	10^8	10^7	10^6	10^5	10^4	10^3
Frecuencia (Hz, ciclos/segundo)																		

Figura 1.3: Espectro electromagnético.

El hombre por naturaleza tiene la capacidad de detectar ondas electromagnéticas sólo que en la región en que puede hacerlo es muy limitada. Del espectro electromagnético, el hombre ve únicamente la región llamada del visible (390 nm a 780 nm), quedando fuera de su percepción directa un intervalo enorme de radiación electromagnética, antes y después del visible. Para suplir esta deficiencia, el hombre ha construido instrumentos con los cuales puede detectar todo el espectro, por ejemplo, existen detectores para longitudes de onda muy pequeñas (rayos x y rayos gamma) y para longitudes de onda grandes (ondas de radio y microondas). Existen, dos ventanas en la atmósfera a través de las cuales recibimos radiación extraterrestre, la óptica y la de radio. La ventana óptica siempre ha estado a nuestra disposición ya que nuestros ojos son sensibles a las radiaciones que cruzan por esta ventana. Pero la ventana de radio nos fue accesible sólo hasta hace apenas unas cuantas décadas cuando se empezaron a desarrollar los radiotelescopios.

La exploración del universo exterior a través de la ventana de radio se inició en el pasado siglo. Las primeras señales provenientes del espacio fueron detectadas por el ingeniero estadounidense Karl Jansky, quien trabajando en el ajuste de antenas de radar, notó que ocurrían interferencias en determinadas posiciones de estas antenas. Inicialmente Jansky no sospechó que estas interferencias pudieran provenir del espacio exterior, pero posteriormente se dio cuenta que la fuente de interferencias se movía en el cielo, exactamente como lo hacen las estrellas y el Sol. Esto lo llevó a la conclusión de que la fuente de radiación que interfería sus equipos no estaba en la Tierra sino en el espacio. Las señales de interferencia captadas por Jansky venían del centro de nuestra galaxia. Jansky anunció su descubrimiento el 27 de Abril de 1933, el cual se puede considerar como el nacimiento de la radioastronomía. Sin embargo, no fue sino hasta 1942 que el astrónomo británico J.S. Hey pudo detectar señales de radio provenientes del Sol. La energía que se recibe en la Tierra en forma de ondas de radio es tan pequeña que, las radioemisiones suelen tener sus propias unidades, llamadas "Jansky". Un Jansky es igual 10^{-26} watt/m Hz y representa la potencia por unidad de área, por unidad de ancho de banda emitida por una radiofuente.

Pero la pregunta es por qué difiere el problema de observar la radioemisión solar de la observación de otros objetos, tales como la Luna, los planetas o las radiogalaxias?. Bueno, pues en primer lugar, la radiación del Sol es mucho más poderosa que la de otras fuentes celestes de radio. Así el proyectista de instrumentos puede sacrificar sensibilidad a cambio de otras características que pueden ser más imperativas. En segundo lugar, mucha de la radioemisión del Sol es altamente esporádica y los instrumentos deben proyectarse para obtener el máximo beneficio de los breves períodos de intensa actividad.

En el Sol existen fenómenos tales como las ráfagas por ejemplo, que emiten toda la gana del espectro electromagnético y que puede ser captada en el espacio interplanetario por cohetes espaciales.

1.3.2 Emisión corpuscular

Cuando se produce una ráfaga solar, no solo se libera emisión electromagnética, sino también emisión corpuscular. La investigación de esta emisión invisible a simple vista, es una herramienta poderosa para descifrar el misterio de la estructura física del Sol. La emisión corpuscular son partículas energéticas que salen a gran velocidad, es decir iones y electrones energéticos que bombardean la Tierra en todas direcciones y que llegan minutos después de producirse la ráfaga.

En el siguiente capítulo se hablará con más detalle de todos estos fenómenos de corta duración y que ocurren en las regiones activas de nuestra estrella más cercana, el Sol.

En el instituto de geofísica se encuentra el radiointerferómetro solar de base pequeña (RISBP) que opera en una frecuencia central de 7.7 GHz (con longitud de onda de aproximadamente 4 cm) y con un ancho de banda de 500 MHz; es de construcción soviética y es un instrumento de alta precisión para el estudio de regiones activas en el Sol. En estas regiones existen grandes "explosiones" llamadas ráfagas solares las cuales no son un fenómeno extraordinario, sino manifestaciones comunes de la actividad solar. Las ráfagas son la fuente de radiación de alta energía (energías de hasta GeV). Indudablemente, una ráfaga puede actuar como un acelerador gigantesco de partículas, pero el secreto de su funcionamiento es uno de los misterios no resueltos de la física solar.

Cuando una ráfaga solar de gran magnitud tiene lugar, es acompañada a menudo de una EMC con efectos importantes sobre satélites artificiales de comunicación, sobre el campo magnético terrestre (generando las tormentas magnéticas que afectan la ionosfera y el suministro de energía eléctrica) y como muestran algunas investigaciones, puede afectar el clima terrestre. Debido a esto, a esta fenomenología se le conoce en la actualidad como clima espacial.

Es por eso que resulta de gran interés estudiar estos fenómenos para aprovechar los beneficios y alertando sobre los riesgos de tal energía proveniente del Sol.

El RISBP capta emisión en microondas, y tiene la ventaja de que no es necesario tener que colocarlo en el espacio, ni tampoco se necesita un cielo despejado para detectar la emisión. Esto permite llevar a cabo un monitoreo continuo de la actividad solar a un costo relativamente bajo.

Anteriormente se han realizado diferentes estudios de ráfagas solares. En esta tesis, el objetivo central es estudiar 71 eventos en microondas detectados con el RISBP en el período de 1991- 1992, y determinar las características físicas que hacen que algunos de estos eventos estén relacionados con datos de la emisión de rayos gamma, EMC y con la detección de partículas energéticas en el medio interplanetario.

Se hace un análisis de los datos mediante la estadística al tomar los eventos que consideré asociados con algún fenómeno solar, y aparentemente no existe una relación apreciable entre ellos.

Los resultados de esta tesis pueden ser de mucha importancia, ya que la emisión en una ráfaga tiene repercusiones inmediatas sobre la Tierra y hasta pueden ser peligrosas.

Los principios físicos que describen estos fenómenos son descritos con cierto detalle en esta tesis.

En el siguiente capítulo se hace una breve descripción de lo que es la emisión electromagnética y corpuscular durante ráfagas. En el tercer capítulo se analizan los datos de los eventos y su relación entre ellos. En el capítulo cuarto se discuten los resultados obtenidos, y en el último capítulo (5) se dan las conclusiones a las que se llega.

Capítulo 2

Emisión electromagnética y corpuscular durante ráfagas

La observación del espectro de un objeto, es decir, de las diversas radiaciones que emite, permiten determinar algunos parámetros, como por ejemplo su forma, tamaño, temperatura, densidad, composición química, etc. La emisión es consecuencia del movimiento de las partículas atómicas que componen a toda la materia, que al interactuar entre ellas o con los campos magnéticos y eléctricos producen la radiación.

Los procesos de radiación continua se pueden dividir en dos:

1. Emisión térmica.- son partículas que se mueven al azar resultando la emisión llamada Bremsstrahlung o radiación libre- libre y por la radiación giroresonante o ciclotrónica que es la aceleración constante que sufren las partículas de baja energía en las líneas de un campo magnético y en consecuencia emiten radiación. Se les llama también partículas no relativistas producidas por ráfagas pequeñas
2. Emisión no térmica.- son partículas que por lo general tienen sus movimientos de alguna manera ordenados por un campo magnético y con energías relativistas, emitiendo radiación sincrotrónica, la cual es cuando las partículas quedan atrapadas en intensos campos magnéticos los cuales se encuentran en las regiones activas del Sol. Siguiendo una trayectoria espiral y emitiendo radiación sincrotrónica, para la cual casi toda la energía es emitida en la dirección del movimiento dentro de un cono angosto cuyo eje es tangente a la trayectoria de la partícula.

Como se sabe el Sol está compuesto de plasma, el plasma que se encuentran al centro del Sol, aunque no forman parte de las reacciones nucleares durante la ráfaga, juegan un papel muy importante en la emisión de energía tanto electromagnética como corpuscular hacia el espacio interplanetario, ya que de alguna manera suministran energía hacia la atmósfera solar .

26CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

Cuando ocurre una ráfaga solar, libera energía en forma de radiación electromagnética y partículas energéticas (principalmente protones y electrones). La radiación electromagnética se clasifica de acuerdo a la energía o longitud de onda, la cual transporta la energía del Sol, lo mismo que las partículas energéticas tales como protones y electrones los cuales se clasifican como "emisión corpuscular".

En las ráfagas solares la emisión generalmente esta descrita en términos de la línea de emisión $H\alpha$ con longitud de onda de 6563 Å (y también en rayos x). Observacionalmente se puede identificar tres etapas básicas (figura 2.1) y en las que se cree, la aceleración de partículas esta presente, las cuales se dan a continuación.

1. Fase precursora o pre-ráfaga.- En esta fase comienza con un ligero aumento en la emisión térmica del arco coronal (Brown et al, 1981) en una región activa, en donde se generan electrones calientes y la emisión de rayos-x suaves aumenta en intensidad (Simnett y Strong, 1984). La duración de éste fenómeno dura, aproximadamente desde algunos minutos antes de la fase impulsiva, hasta varias horas.
2. Fase impulsiva.- Se caracteriza porque la intensidad y el área de la emisión electromagnética se incrementan. Esta fase es seguida de la emisión de rayos x duros y radiación en microondas. Se producen durante el evento, iones y electrones relativistas y ultrarelativistas. Esta usualmente asociada con movimientos del plasma con velocidades de 800 a 2000 km/seg, es por eso que se le identifica con una onda de choque magnetohidrodinámica que se propaga a través de la corona y esta asociada con eyecciones de masa coronal. Es una fuente intensa de microondas y rayos x. La duración es de unos 5 minutos a una hora. El mecanismo por el cual es emitida la fase impulsiva es la radiación sincrotrónica
3. La fase principal o gradual.- Esta fase se caracteriza porque su intensidad desciende suave y lentamente hasta alcanzar el nivel original antes de la pre-ráfaga, es decir es cuando el evento deja de emitir radiación. Esta fase puede durar de una hora a un día.

A continuación hablaré de la emisión de rayos gamma, rayos x y radio que es emisión electromagnética relacionada con la aceleración de partículas durante el proceso de una ráfaga. Posteriormente hablaré de los protones y electrones la cual es emisión corpuscular.

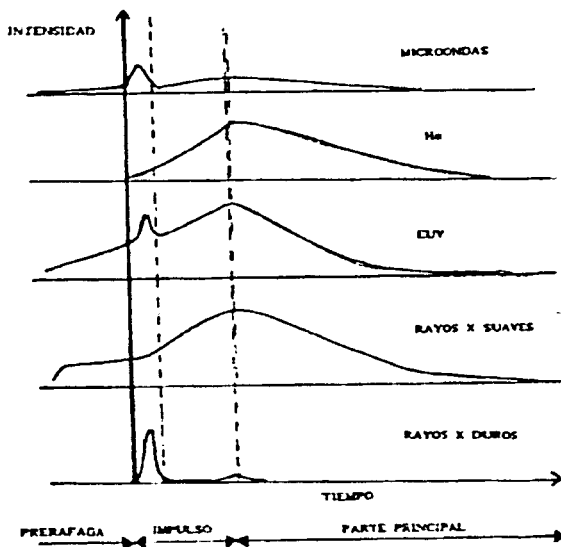


Figura 2.1: Intensidad de una ráfaga en diferentes longitudes de onda

2.1 Emisión de rayos gamma

La radiación gamma en términos generales, son ondas electromagnéticas de muy pequeña longitud de onda y por tanto de frecuencias y energías muy altas, que se propagan en línea recta. Esta emisión es producida por el núcleo del átomo, protones, partículas alfa e iones pesados, durante su desintegración, lo que se le llama fusión nuclear, y también se producen por fisión nuclear. Y como no tiene carga eléctrica no es afectada por los campos eléctricos y magnéticos que hay en el Sol.

El gran obstáculo para el proceso de fusión surge debido a los núcleos livianos que están cargados eléctricamente, y la repulsión hace muy difícil su unión o fusión. La

28CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

única forma para lograr la fusión de los núcleos es ponerlos en movimientos rápidos, de manera que dos de ellos lleguen a unirse a pesar de la fuerza eléctrica de repulsión. Pero para ponerlos en movimiento rápido significa elevarlos hasta una temperatura extremadamente alta, de algunos millones de grados, o por algún mecanismo que sea capaz de acelerarlos como puede ser una ráfaga por ejemplo. Es sólo así, que los núcleos se mueven con rapidez suficiente como para combinarse y, mediante la fusión liberar energía en forma de rayos gamma.

Las ráfagas solares por ejemplo aceleran enormemente las partículas que se encuentran en el Sol las cuales salen disparadas a gran velocidad en todas direcciones, principalmente protones y núcleos de átomos de helio llamado helio ligero entre otros. Las partículas que salen dirigidas hacia el interior del Sol interactúan con los gases que se encuentran en esas zonas y producen la fusión nuclear, generando los rayos gamma.

La radiación gamma es emitida casi exclusivamente durante la fase impulsiva del evento con duración de entre 10 y 1000 segundos (Pérez-Enrique, 1991).

2.1.1 Observación de los rayos gamma

Hace algunos años se creía que las reacciones nucleares tenían lugar sólo en las profundidades del interior del Sol, es decir en el núcleo. Pero con el tiempo, los investigadores encontraron que no es así, ya que existen reacciones nucleares también en la atmósfera solar durante una ráfaga. Las primeras observaciones de rayos gamma durante una ráfaga fueron realizadas durante el evento del 4 de Agosto de 1972 (Chupp et al, 1973) con un detector de cristal de NaI(Tl) a bordo del satélite OSO-7.

Como se sabe, las observaciones de los rayos gamma se llevan a cabo por satélites artificiales ubicados fuera de la atmósfera terrestre.

Como ejemplo se encuentran: el espectrómetro de rayos gamma colocado en el satélite SMM (Chupp et al., 1982), el cual observó rayos gamma de una gran cantidad de ráfagas (Murphy y Ramaty, 1985). El detector de rayos gamma del satélite Hinotori (Yoshimori et al., 1983), los cuales muestran que aún en ráfagas pequeñas existe emisión de rayos gamma. Estas observaciones son una clara prueba de que los protones y los iones pesados son acelerados a altas energías en ráfagas solares e interactúan nuclearmente con la atmósfera del Sol. Estos satélites para detectar los rayos gamma, no producen imágenes, sólo miden la dirección de la fuente a través de un gran número de celdas. Para la detección de este tipo de radiación se utiliza el centelleo. Este método consiste básicamente en que un rayo gamma choca con un átomo del detector que en ese momento emite un relámpago o centelleo de luz visible cuando choca con una pantalla fluorescente, la cual se mide fácilmente con un fotomultiplicador y así conocer la dirección de la fuente de radiación.

Gracias principalmente a las observaciones en rayos gamma, se ha podido poner en claro que los protones de alta energía se encuentran presentes durante la fase impulsiva de la ráfaga.

En muchos modelos de ráfaga solares, se dice que cuando ocurre una ráfaga, son lanzados al espacio chorros de partículas energéticas (iones y electrones) que se dirigen tanto hacia abajo como hacia arriba de la atmósfera solar, y no se sabe con exactitud si esta aceleración de partículas es simétrica. Las partículas que se aceleran hacia abajo de la atmósfera solar, principalmente protones con energías mayores a 10 Mev, son detenidos e interactúan nuclearmente con la atmósfera solar depositando su energía y simultáneamente generan emisión de rayos gamma y rayos-x duros. Debido a la energía depositada, la presión de la cromosfera se incrementa y el plasma es evaporado (Kundu et al., 1989; Zharkova y Brown, 1994).

Indudablemente, los rayos gamma observados durante ráfagas solares son una prueba indiscutible de las energías tan altas que un fenómeno de estos es capaz de producir. El estudio de los rayos gamma está poco desarrollado en comparación con el resto de la radiación electromagnética, y creo que los grandes descubrimientos en este campo están por descubrirse.

2.2 Emisión de rayos-X

La teoría electromagnética predice que cuando las cargas eléctricas se aceleran o desaceleran, deberán emitir radiación electromagnética. La radiación de rayos-x es emitida por la desaceleración del electrón y es, a menudo conocida por la palabra equivalente en alemán "Bremsstrahlung" (radiación de frenado originado por la transición libre-libre). Es el método más aceptado para la producción de rayos-x en la atmósfera solar. La presencia de este tipo de radiación de frenado, está relacionada con el hecho de que el electrón es una partícula, en primer lugar, cargada, y en segundo lugar, liviana. Sólo gracias a estas dos propiedades el electrón es frenado bruscamente por los núcleos atómicos que se encuentra a su paso.

Las partículas que salen dirigidas hacia el interior del Sol cuando ocurre una ráfaga, producen la emisión de rayos-x, pero también esta radiación se producen en la corona, ya que a mediados del siglo pasado observaciones realizadas por cohetes que apenas lograban transpasar la atmósfera terrestre, lograron obtener rayos-x provenientes de la corona solar.

2.2.1 Clasificación de los rayos-x

Los rayos-x producidos por una ráfaga, no logran penetrar las capas atmosféricas de la Tierra, por lo que se requiere, al igual que los rayos gamma, de satélites artificiales ubicados fuera de nuestra atmósfera para poder detectar este tipo de emisión, los cuales se pueden clasificar o dividir en dos grupos de rayos x asociados a ráfagas:

30CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

1. **Rayos-x duros.**- este tipo de emisión se presenta durante la fase impulsiva y gradual, es de origen no térmico causado probablemente por chorros de electrones energéticos, los cuales viajan hacia abajo de la atmósfera solar. Se cree que cuando aparecen corrientes eléctricas en los arcos de los campos magnéticos, es cuando se reduce la energía de los electrones emitiendo los rayos-x duros (Karlícký, 1995). Tienen una longitud de onda menor de 1 \AA y con energías que van entre 10 y 100 kev o más, ya que el GRANAT ha observado rayos-x duros arriba de 1300 kev. (Gilfanov et al., 1991; Sunyaev et al., 1991). Es muy probable que esta emisión ocurra en ráfagas pequeñas o subráfagas. El espectro de rayos-x duros es potencial, de la siguiente forma (Dulk et al.1985):

$$\frac{dJ(E)}{dE} = CE^{-\gamma} \text{ fotones/inskev} \quad (2.1)$$

donde $2.5 < \gamma > 5.0$ y $10 \text{ kev} < E > 60 \text{ a } 100 \text{ kev}$.

2. **Rayos- x suaves.**- son también llamados de baja energía y que se encuentra entre 1 y 10 kev. Son de origen térmico con una longitud de onda de 1 \AA a 10 \AA , y son de mucha importancia en la liberación de energía durante las ráfagas (Antonucci et al. 1985), y por lo general se presentan antes del inicio de la ráfaga.

Es probable que los rayos-x suaves tengan su origen en el plasma calentado muy rápidamente antes de la explosión de la ráfaga por las colisiones de los electrones energéticos mismos que son los responsables de los rayos-x duros (Tanaka et al., 1982)

El estudio de las ráfagas y de las regiones activas del Sol en rayos-x, han dado información clave en el estudio de la estructura de la atmósfera solar, pues las imágenes en rayos-x han facilitado sustancialmente este análisis. El satélite de los E.U.A. denominado Einstein, fue el primero en detectar y enviar imágenes del cielo en rayos-x, y fue la base de la observación del Universo a través de los rayos-x.

2.3 Emisión de radio

Como sabemos las cargas eléctricas dotadas de movimientos rápidos son las que producen las ondas de radio. En el Sol la emisión de radio también se produce por el mismo fenómeno. Por ejemplo los campos magnéticos del Sol obliga a los electrones que entran en ellos a describir trayectorias helicoidales en torno a las líneas de campo obligándolos a radiar, y normalmente los hacen a la frecuencia de giro que esta dada (para $v \ll c$) por:

$$f_H = \frac{Be}{2mc\pi} \quad (2.2)$$

Donde B es el campo magnético en gauss, e y m la carga y masa del electrón respectivamente, y c la velocidad de la luz. La energía electromagnética liberada es llamada radiación ciclotrónica.

Lo mismo sucede cuando ocurre una ráfaga solar, ya que el propio proceso interno de producción de energía pueden fácilmente acelerar o agitar las cargas eléctricas de los átomos que se encuentran en la atmósfera del Sol dando lugar a enormes cantidades de energía en la banda de las ondas de radio.

Las ondas electromagnéticas u ondas de radio provenientes del Sol llegan a la superficie de la Tierra en lo que se le llama ventana de radio, con una longitud de onda que abarca desde $\lambda=1$ mm hasta los $\lambda=30$ m y son detectadas utilizando receptores que se encuentran en la superficie de la Tierra.

Estudios realizados han demostrado que las ondas de radio son originadas por una corriente de partículas producidas por una ráfaga las cuales son arrojadas hacia afuera de la atmósfera solar al espacio interplanetario, y cuando la corriente de partículas atraviesa la corona solar, llega a una delgada capa del plasma a una altura h_c , por encima de la fotosfera, y es precisamente allí donde esta corriente de partículas pone en oscilación al plasma de electrones, y como mencione anteriormente emitirá las frecuencias de radio apropiadas a las concentraciones de electrones en los niveles sucesivos.

Lo que determina h_c es la forma en que varía la opacidad del plasma con respecto a la altura, y es precisamente esa altura en donde el plasma se hace lo bastante opaco a la frecuencia f de las ondas de radio observadas para radiar libremente y sin embargo no tan opaco como para impedir que escape la frecuencia de radio f emitida. De este modo vemos que el nivel efectivo de radiación coincide con la altura en la que la frecuencia crítica f_0 del plasma es aproximadamente igual a la frecuencia de las ondas de radio f observadas ($f \approx f_0$).

En la actualidad, parece que no existe razón para dudar de la sencilla hipótesis de que las intensas emisiones de radio son provocadas en la corona solar por el paso de partículas arrojadas por las ráfagas las cuales escapan de la corona solar y son detectadas por los radiotelescopios instalados en la Tierra. Estas ondas de radio son emitidas poco tiempo después de que ocurra la ráfaga, y todas ellas emiten ondas de radio.

Se ha establecido que la emisión de ondas de radio provenientes de las regiones activas solares es de origen térmico (Lang et al. 1987; Nitta et al.1991; Gopalswamy et al.1994).

Las observaciones de radio del Sol en los diferentes rangos de frecuencias muestran varios tipos de radioemisión solar los cuales se han clasificado en:

2.3.1 Microondas

Puesto que la radiación asociada a fenómenos giromagnéticos en general tiene cierto grado de polarización, entonces como la emisión en microondas es producida de la misma manera que la emisión de radio, tendrá cierto grado de polarización.

Los destellos de microondas son pequeñas explosiones inesperadas y momentáneas que estallan continuamente en las regiones activas y se observan en la línea $H\alpha$ del hidrógeno de la siguiente manera a grandes rasgos:

Cerca de una mancha solar, aparece una pequeña superficie brillante de forma irregular; a veces se trata sólo de un aumento de brillo en un flóculo ya existente. La erupción de la mancha o nube brillante se produce con una rapidez de aproximadamente 10 a 30 segundos, y el destello sólo se percibe cuando su brillo ya es demasiado alto. Al alcanzar su punto máximo, el brillo del destello es tan grande que la superficie solar circundante parece oscura. Se han observado destellos de 3 a 4 veces más brillantes que las zonas adyacentes de la superficie solar. Posteriormente viene una declinación lenta del destello, durante la cual el brillo fluctúa, y entonces se halla una pequeña mancha en el lugar en el que se encontraba el destello. Por lo general cuanto más rápido se desarrolla el destello, mayor es el brillo que adquiere. En promedio el desarrollo de un destello completo es de aproximadamente de 4 a 10 minutos, aunque se han observado marcadas desviaciones de estos valores, por lo que es muy difícil decir el tiempo preciso, pero con este tiempo dado se puede tener una idea de la duración de estos fenómenos. Las dimensiones de los destellos también pueden variar, pero para darse una idea, el Espectrómetro de Diagnóstico Coronal (CDS) a bordo del Satélite Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) detecta destellos que tienen diámetros de aproximadamente el diámetro de la Tierra.

Los destellos en microondas son clasificados (Kundu, 1980) en tres tipos y son los siguientes:

1. Destellos impulsivos. Este tipo de destellos tienen una duración de por lo general de 1 a 10 minutos. Ocurren simultáneamente con destellos de rayos x duros y se cree que es radiación sincrotrónica (Takakura, 1967). Tienen una temperatura de brillo generalmente mayor de 10^8 k.
2. Pos-destello. Cuando ocurre un destello, este tiene algunas veces una cola de larga vida con una estructura muy compleja la cual se le llama pos-destello y tienen una duración de hasta una hora con una temperatura de brillo general de 10^6 k.
3. Elevación y descenso gradual. Este destello se cree que es el resultado de la contracción rápida de un campo magnético local calentando el gas encerrado, y por tanto es solamente radiación térmica. La emisión aumenta lentamente pero en la mayoría de los casos no alcanza una fase explosiva y entonces el flujo

desciende lentamente a su nivel original, pero algunas veces se eleva tanto el flujo, que se desata la explosión la cual es característica de una ráfaga solar.

En concreto, los destellos solares pueden dar información sobre la aceleración de partículas energéticas, y se originan en diferentes niveles de la atmósfera solar que aparecen como el nacimiento y muerte rápida de nubes brillantes y luminosas cerca de las manchas solares y se asemejan a una explosión que es acompañada por una vasta emisión de radiación en ondas de radio. Es probable que tengan temperaturas de aproximadamente de 10 000 a 15 000 K.

2.3.2 Ondas métricas

La emisión de ondas de radio métricas ha sido clasificada por Wild et al. (1963) en 5 tipos principales, los cuales los divide en dos, fase I y fase II y son los siguientes:

FASE I.

Este tipo de emisión solamente se observa en ráfagas pequeñas las cuales, sin tomar en cuenta el número romano que las clasifica ya que existen varios tipos de explosiones, se clasifican de la siguiente manera:

1. Radio explosión tipo III.-también se le llama de corrimiento rápido y son las más frecuentes que se registran en los observatorios: tienen una duración de aproximadamente 10 segundos. Se cree que son originadas por corrientes de electrones en el rango de energías de 10 a 100 kev y que viajan hacia arriba de la atmósfera solar, a través de la corona, a lo largo de las líneas abiertas del campo magnético (Suzuki and Dulk, 1985), con una velocidad de aproximadamente 1/3 de la velocidad de la luz.

Estos electrones relativistas excitan ondas de plasma las cuales se convierten en las ondas de radio. Este tipo de radio explosiones relativistas también fueron reportadas (Poquerusse, 1994). También se han observado que a veces son acompañadas de rayos-x (Raulin et al., 1996), y se piensa que es radiación sincrotrónica.

2. Radio explosión tipo V.- la misma corriente de electrones que causa las emisiones tipo III son las que producen la radioexplosión tipo V (Suzuki and Dulk, 1985), y tienen una duración de 1 a 5 minutos aproximadamente. Wild propuso que los electrones habían sido atrapados finalmente en campos magnéticos coronales deteniendo el movimiento de la corriente de electrones como un todo, pero dentro

34CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

de la corriente los electrones individuales continuarían saltando hacia atrás y hacia adelante emitiendo esta emisión.

Se cree que al igual que las radioexplosiones tipo III se trata de radiación sincrotrónica, y no se sabe con precisión el origen de este tipo de explosión.

FASE II.

La anterior fase era para ráfagas pequeñas o subráfagas, pero también existe otra clasificación hecha por Wild para ráfagas grandes, la cual se le llama fase II y son, sin tomar en cuenta el número que los clasifica, las siguientes:

3. Radioexplosión tipo I.- también se le llamada tormenta de ruido y en el período de máxima actividad este tipo de emisión se presenta de unas horas a un día. Se originan por los electrones atrapados en la corona solar y lanzados en dirección vertical. Durante todo el tiempo de la evolución de la región activa existen procesos de aceleración débil y entonces se detectan radioexplosiones tipo I (Elgaroy, 1977). Se piensa que son el resultado de ondas de plasma, pero otros investigadores creen que es emisión giromagnética. lo cierto es que hasta ahora no existe un proceso de emisión aceptado generalmente.
4. Radioexplosión tipo II.- también llamada de corrimiento lento y aparece minutos después de desaparecer las explosiones tipo III. En el período de máxima actividad tienen una duración de 5 a 30 minutos. Los electrones acelerados viajan con gran velocidad, es por eso que se piensa que la emisión es creada por una onda de choque magnetohidrodinámica (Wild et al. 1963). No se sabe con exactitud que tipo de emisión es.
5. Radioexplosión tipo IV.- También llamada emisión continua de banda ancha, ya que la radiación cubre desde longitudes de onda larga hasta las más cortas. Comienza unos pocos minutos después de haber desaparecido las explosiones tipo II y tienen una duración en promedio de aproximadamente una hora. Se cree que es emisión sincrotrónica, es decir una gran nube de electrones relativistas viajando aproximadamente a 3000 km/s. Estos son atrapados por horas o días en los campos magnéticos y luego empiezan a oscilar a lo largo de las líneas de campo formando ondas de plasma y como sabemos estas se transforman en ondas de radio.

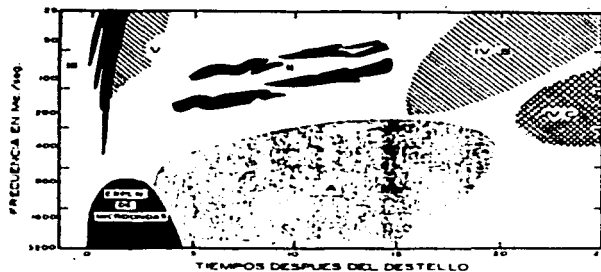


Figura 2.2: Modelo idealizado de los fenómenos de radio que acompañan a un destello, como podrían ser expuestos por un espectrógrafo de banda ancha. Los números romanos indican los tipos de emisión.

La discusión anterior es solamente una idealización de los procesos reales que ocurren durante una ráfaga, o una eyección de masa coronal, algunos investigadores piensan que estos procesos se dan al azar (Islaker and Benz, 1994), mientras que otros piensan que son fenómenos periódicos (Aschwanden et al., 1995). Sea lo que sea, no cabe duda que se tienen que hacer más estudios al respecto para entender mejor estos fenómenos solares.

2.4 Partículas energéticas

Como ya se mencionó anteriormente, cuando ocurre una ráfaga solar se aceleran partículas energéticas que salen disparadas en todas direcciones, y algunas de estas partículas salen al espacio interplanetario alcanzando aceleraciones tan altas como los llamados rayos cósmicos solares (protones) que alcanzan a llegar a los entornos de nuestro planeta Tierra. Aunque también los rayos cósmicos son producidos en su mayor parte en diversos lugares de nuestra galaxia por la muerte violenta de estrellas supernovas y los pulsares. De hecho, en la actualidad se sabe que el Sol emite rayos cósmicos de baja energía, pero en cantidades muy débiles, pero cuando ocurre una ráfaga solar, se emiten rayos cósmicos de energías muy altas.

Las partículas energéticas arrojadas durante una ráfaga, tales como los protones, electrones, iones pesados y neutrones entre otros, son detectados directamente en el espacio interplanetario por naves espaciales o satélites y así, con aparatos electrónicos poder obtener algunas medidas tales como su energía, flujo, velocidad y dirección.

Cuando una partícula (electrones o protones) con carga q y velocidad V se mueve en una región en la que existe un campo magnético y un campo eléctrico, actúa sobre ella una fuerza dada por

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{V} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

donde \vec{B} es el vector de campo magnético y \vec{E} es el vector de campo eléctrico. Esta expresión se conoce como fuerza de Lorentz.

En una partícula la masa crece con la velocidad, pero aún en el estado de reposo relativo, la partícula posee cierta masa, la cual se le llama masa en reposo m_0 , para la cual los fotones carecen totalmente de ella y es la que caracteriza las distintas partículas de materia (electrones, protones, etc.) llamada emisión electromagnética o corpuscular. Para altas energías según la teoría espacial de la relatividad, se tiene que

$$E = \int_0^v \mathbf{F} dr \quad (2.4)$$

Para una partícula de materia tenemos

$$E = m_0 c^2 ((1 - \beta^2)^{-1/2} - 1) \quad (2.5)$$

donde m_0 es la masa en reposo de la partícula, c la velocidad de la luz y β es una fracción de la velocidad de la luz.

La energía total de una partícula relativista es la suma de la energía cinética y la energía equivalente a la masa en reposo $m_0 c^2$

Entonces tenemos:

$$E_{total} = m_0 c^2 (1 - \beta^2)^{-1/2} \quad (2.6)$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por la gran cantidad de partículas que una ráfaga es capaz de producir, desde electrones energéticos hasta iones y electrones ultrarelativistas (Ramaty y col. 1980), se puede decir que una ráfaga solar actúa como un acelerador gigantesco de partículas. La aceleración de iones y electrones ocurre simultáneamente durante la fase impulsiva y en un tiempo de tan sólo segundos o menos. Pero cómo es que se sabe que en una ráfaga solar se aceleran partículas?, bueno pues es por su observación directa en el espacio interplanetario por medio de satélites, y también aquí en la Tierra detectadas en los laboratorios. Estas partículas son átomos ionizados y electrones en igual número aproximadamente, los cuales están formados por hidrógeno y helio que son los elementos que más abundan en la cromosfera solar, se propagan a través del espacio interplanetario y alcanzan la magnetosfera de la Tierra aproximadamente una hora después de haberse generado la ráfaga con una velocidad ultrarelativista durante su viaje causando serios problemas a las radiocomunicaciones terrestres.

A continuación hablaré de los electrones y protones en ráfagas solares, que son las principales partículas energéticas liberadas al medio interplanetario y que son la prueba más directa de la existencia de un mecanismo de aceleración durante las ráfagas solares.

2.4.1 Electrones

Como ya mencionamos anteriormente, los electrones que viajan en la dirección del interior del Sol son los que generan los rayos x en una ráfaga solar, pero también hay electrones que salen en dirección de la Tierra, los cuales son llamados, de acuerdo a las características del evento electrones no relativistas, relativistas y ultrarelativistas. Estos eventos son clasificados en dos, que son:

1. Eventos puros.- en estos eventos se encuentran los electrones no relativistas, los cuales son producidos y acelerados por lo general en ráfagas pequeñas; son observados en un rango de energía de 10-100 kev. y son probablemente de origen térmico. Para estos eventos el número de partículas liberadas al medio interplanetario es aproximadamente de 10^{31} electrones arriba de los 20 kev. (Pérez-Enriquez., 1987).
2. Eventos mixtos.- en este tipo de eventos, las ráfagas solar liberan al espacio no sólo electrones sino también protones, se caracteriza porque los electrones son tanto relativistas como ultrarelativistas. El número de electrones en la región de aceleración es de aproximadamente 10^{36} electrones arriba de los 20 kev. (Pérez-Enriquez, 1987).

Los electrones son arrojados como sabemos por las ráfagas y éstos viajan por el espacio interplanetario llegando a la Tierra aproximadamente una hora después de que

38CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

ocurra e interactúan con la atmósfera terrestre dando lugar al gran espectáculo de las auroras polares las cuales son generadas por los electrones con energías de unos 30 eV.

2.4.2 Protones

Cuando ocurre una ráfaga solar, son lanzados al espacio interplanetario partículas energéticas, entre ellas se encuentran los protones. Este tipo de eventos no son tan comunes como los eventos de electrones no relativistas, tal vez sea por la diferencia de masas. Estudios realizados demuestran que todas ráfagas pueden producir iones energéticos y han encontrado y calculado (Biswas y Radhakrishnan, 1973), que el número de partículas arrojadas al medio interplanetario es, para el evento del 28 de Septiembre de 1961, aproximadamente de 2×10^{33} protones, con una energía total de 4×10^{27} erg.

Se han hecho estudios acerca de métodos de aceleración de protones en ráfagas solares, y se ha encontrado que es muy importante en la aceleración (Mackinnon, 1991; Miller and Roberts, 1997; Smith and Miller, 1997) en ondas de frecuencias bajas (ondas de Alfvén).

Son muy raros los eventos de protones relativistas también llamados "rayos cósmicos solares" los cuales consisten de átomos cargados positivamente que son arrojados por la ráfaga y que atraviesan el espacio interplanetario con velocidades cercanas a la de la luz, llegando a la Tierra en menos de una hora generando los llamados chaparrones electrónico-nucleares los cuales dan origen a partículas secundarias entre ellas los llamados mesones. En estos eventos de rayos cósmicos solares se liberan al espacio interplanetario energías del orden de 10^{32} erg en total (tanto electromagnética como corpuscular) durante la ráfaga.

La energía de los rayos cósmicos en una ráfaga solar son tan altas que aun los investigadores no han podido sobrepasar estas energías por medios artificiales aquí en la Tierra.

No se sabe todavía un mecanismo de aceleración de protones que de respuesta al gran misterio de los rayos cósmicos solares, pero se siguen investigando estos fenómenos y, tal vez algún día sea aceptada en general una teoría que explique satisfactoriamente estos fenómenos solares.

Se cree que la aceleración de partículas energéticas de varios Mev ocurre principalmente durante la fase impulsiva, y a veces con una escala de tiempo de 1 segundo (Kane et al., 1986).

La emisión electromagnética y corpuscular que mencione anteriormente, trae repercusiones en la Tierra, ya que afectan a las telecomunicaciones y los satélites.

2.5 Microondas de regiones activas solares obtenidas con el radiointerferómetro solar de base pequeña a $\lambda=4$ cm

Una antena es desde un punto de vista, un elemento acoplador entre campos electromagnéticos en una línea de transmisión y el medio en donde han de propagarse. Desde este punto de vista considero a las antenas como la fuente receptora de los campos electromagnéticos que existen en el espacio interplanetario.

En la frecuencia de microondas, una de las antenas más utilizadas es la antena parabólica que tiene la ventaja de una alta directividad debido a su propiedad de convertir ondas esféricas o cilíndricas en ondas planas reduciendo en gran medida la dispersión. Ahora bien, cuando se requiere una mayor directividad que la que puede obtenerse con una sola antena se emplean arreglos de antenas. Un arreglo de antena es un sistema de dos o más antenas iguales orientadas similarmente. Los arreglos de este tipo se utilizan para incrementar la intensidad de campo en ciertas direcciones excitando las antenas simultáneamente.

Los arreglos de antenas hacen uso del fenómeno de interferencia de ondas, que ocurre entre las radiaciones de los elementos del arreglo. La idea básica que fundamenta la teoría de arreglos de antenas, es el principio de superposición de los campos, el cual establece que el campo producido por un conjunto de fuentes es la suma de los campos de las fuentes individuales. Si las fuentes tienen la misma dirección en sus corrientes individuales, el potencial total puede obtenerse por una suma escalar de los potenciales individuales.

Para captar y estudiar las ondas invisibles es necesario construir telescopios, que en el caso de las ondas de radio son los radiotelescopios los cuales son enormes superficies metálicas de forma parabólica, que concentran las ondas de radio provenientes del espacio y luego son amplificadas y analizadas con dispositivos electrónicos y computadoras. Los radiotelescopios pueden funcionar solos o en conjunto, constituyendo lo que se llama un interferómetro.

En la década de los años 70's se desarrollaron los interferómetros de gran resolución en longitudes de onda de radio.

El radiointerferómetro solar de base pequeña de 4 cm de longitud de onda es de construcción soviética y ha sido bautizado con el nombre de IK (es el nombre del segundo día de la semana maya), el cual se encuentra en el instituto de Geofísica de la UNAM, y es un instrumento de alta precisión para el estudio de regiones activas en el Sol. En estas regiones se originan las ráfagas solares y que en especial, este radiointerferómetro capta esas eventos en la región en microondas.

El aparato consta de dos antenas parabólicas de 1 metro de diámetro cada una, montadas en un eje polar común que determina la dirección de la base del interferómetro y están separadas una distancia de 5.24 metros por lo cual corresponde a 131 longitudes

40CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

de onda. Opera con una frecuencia central de 7.7 GHz ($\lambda=4$ cm) con un ancho de banda de 500 MHz. El eje central está orientado a lo largo del eje polar y un motor sincrónico hace girar las antenas de Este a Oeste siguiendo el movimiento diurno del Sol. Cada antena tiene además un desplazamiento independiente en declinación entre ± 25 grados.

En la siguiente figura se muestra el radiointerferómetro que se encuentra en el instituto de geofísica

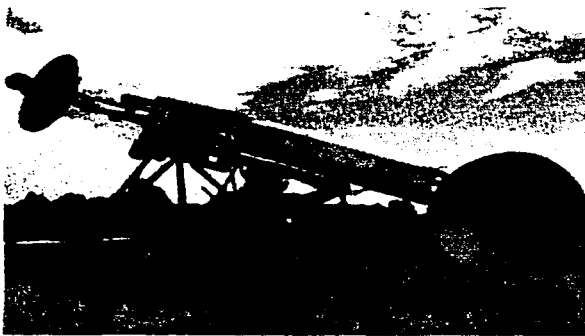


Figura 2.3: Radiointerferómetro utilizado en el registro de emisiones de microondas

2.5.1 Antenas

Las antenas del interferómetro pueden orientarse en diferentes direcciones, pero se mantienen siempre paralelas entre sí.

Es más fácil evaluar las características de una antena cuando está transmitiendo que cuando recibe o capta señal, pero por el teorema de reciprocidad (Rohlf's, 1986) se sabe que las características son las mismas en ambos casos, así que la mayoría de los parámetros usados en la descripción de antenas se evalúa en el modo de transmisión. La respuesta de una antena en función de la dirección se da en el patrón de antena, que generalmente consiste en el número de lóbulos. El lóbulo mayor se llama lóbulo principal y los menores se llaman lóbulos laterales. La envolvente de los lóbulos inter-

2.5. MICROONDAS DE REGIONES ACTIVAS SOLARES OBTENIDAS CON EL RADIOINTE

ferenciales la podemos conocer si dejamos al Sol cruzar sobre el interferómetro, entonces el lóbulo mayor o ancho de haz está dado en radianes con una buena aproximación por:

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (2.7)$$

donde λ es la longitud de onda y D es el diámetro de las antenas. Para el interferómetro se cumple la relación anterior, pero ahora D es la separación entre las antenas y λ es la longitud de onda a la que opera. Entonces, en el interferómetro tenemos que, en la dirección Este-Oeste se tiene un ancho de haz de:

$$\theta = \frac{\lambda}{d} = \frac{3.9cm}{114cm} = 1^{\circ}57'35'' \quad (2.8)$$

En la dirección Norte-Sur es:

$$\theta = \frac{\lambda}{D} = \frac{3.9cm}{524cm} = 25'35'' \quad (2.9)$$

La geometría del interferómetro se puede ver en la siguiente figura 2.3

Para que en el interferómetro se tenga un patrón de interferencia constructiva, se debe tener un máximo refuerzo de los dos movimientos ondulatorios, es decir cuando las señales de las dos antenas, sur y norte se propagan a través de las guías de onda, deben llegar en fase al anillo híbrido donde ocurre la mezcla de las dos señales. Esto quiere decir que las dos antenas deben captar porciones del mismo frente de onda y que el camino que recorre la señal sea el mismo para las dos antenas, como se muestra en la figura 2.3, en donde la guía de onda en forma de "T", en su lado derecho sólo permite el paso de la señal que viene de la antena norte, y en el lado izquierdo sólo permite el paso de la señal reflejada en el émbolo. Con esta guía se evitan reflexiones de la señal hacia la antena norte que atenuarían considerablemente la señal.

2.5.2 Compensación de caminos

Como se puede ver en la figura 2.3, los caminos que sigue la onda no llegan al mismo tiempo a las dos antenas, solamente lo hacen cuando la declinación solar es igual a cero. Para resolver el problema se procedió de la siguiente manera: Para lograr que el tiempo que tarda en llegar la señal de la antena sur sea el mismo tiempo que tarda en llegar la señal de la antena norte, se coloca una guía de onda con un émbolo en la antena norte. De esta manera se puede variar la longitud de las guías de onda que llevan la señal de dicha antena. La mezcla de las señales deben ser en fase para que la interferencia sea constructiva y se conserve la información captada por las antenas. Para esto es necesario conocer las longitudes de las guías de onda que producen la señal proveniente de las dos antenas.

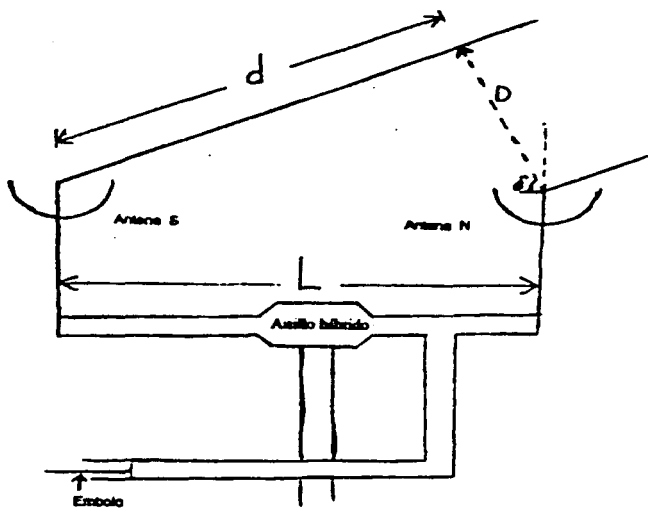


Figura 2.4: Esquema del radiointerferómetro

2.5. MICROONDAS DE REGIONES ACTIVAS SOLARES OBTENIDAS CON EL RADIOINTEI

Las longitudes de las guías de onda son las siguientes:

- Guía de onda de la antena norte $G_N=275$ cm
- Guía de onda de la antena sur $G_s=390$ cm
- Guía de onda del émbolo (valor máximo) $G_e=153$ cm

En los resultados anteriores no se toman en cuenta dos guías de onda flexibles (una en cada antena) porque tienen la misma longitud.

Para calcular la diferencia que debe existir entre las guías de onda norte y sur, primero debemos conocer la diferencia (en tiempo) de la llegada de la señal a las antenas, la cual es

$$t = \frac{d}{c} \quad (2.10)$$

donde c es la velocidad de la luz, d la diferencia de distancias recorridas desde los planos de fase constante hasta las antenas. De la figura 2.3, vemos que

$$d = L \operatorname{sen} \delta \quad (2.11)$$

donde $L = 528.5$ cm es la longitud de la base o la separación entre las antenas, y δ es la declinación del Sol. Así podemos conocer d que es la longitud que debemos añadir o quitar, dependiendo del signo de δ , a la guía de onda norte para que se igualen los caminos de las dos antenas. Ahora, como en física se sabe que la velocidad de las ondas no es la misma cuando viajan en medios diferentes, entonces en el aire, en donde el índice de refracción n_a vale uno, y dentro de las guías de onda es diferente, entonces la velocidad a la que va la información es:

$$v = cn_g \quad (2.12)$$

donde v es la velocidad de grupo, n_g es el índice de refracción de las guías con $n_g=0.726$ y c la velocidad de la luz, por tanto se debe de usar la diferencia en tiempo en lugar de la diferencia en distancia. Como el tiempo que debemos aumentar al recorrido de la señal en la guía de onda de la antena norte esta dada por la ecuación 2.10, y sustituyendo en la ecuación 2.11, se tiene:

$$t = \frac{L \operatorname{sen} \delta}{c} \quad (2.13)$$

y el tiempo que se debe retrasar la señal dentro de la guía de onda es

$$t = \frac{d}{v} \quad (2.14)$$

44CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA

Entonces igualando las ecuaciones anteriores, obtenemos lo siguiente

$$d = L n_p \text{sen} \delta \quad (2.15)$$

donde d es la longitud que las guías norte deben exceder a las guías sur para que la señal que viaja con una velocidad v , se retrase un tiempo t .

Como sabemos que $G_s - G_N = 390 \text{ cm} - 275 \text{ cm} = 115 \text{ cm}$ entonces el émbolo debe aumentar la distancia en donde viaja la señal, que es:

$$d_{emb} = 115 \text{ cm} + d \quad (2.16)$$

Pero se tiene que la señal recorre dos veces la guía de onda que tiene el émbolo, la cual es entonces

$$\ell_{emb} = \frac{d_{emb}}{2} = \frac{115 + d}{2} \quad (2.17)$$

Ahora por último, se tiene que la distancia a la cual se debe introducir a las guías de onda a la varilla del émbolo es:

$$\ell_{var} = G_e - \ell_{emb} \quad (2.18)$$

donde $G_e = 153 \text{ cm}$ que es la máxima longitud de las guías de onda del émbolo.

La calibración del émbolo se hace para cada día debido a que la declinación del Sol (δ_n) cambia rápidamente y hace que la diferencia de caminos varíe día con día.

2.5.3 Receptor

El receptor del radiointerferómetro es del tipo Dicke (Kraus, 1966), el cual está formado por los siguientes canales:

1. Canal de alta frecuencia.- En esta sección la señal amplificada pasa por un filtro de microondas, esto es para evitar ruidos indeseables. Posteriormente viene a un detector el cual baja la frecuencia, para que posteriormente llegue a un preamplificador de baja frecuencia, que amplifica la señal para ser enviada por medio de un cable hacia el laboratorio donde se amplifica aún más, y es cuando la señal sale registrada.
2. Canal de intensidad.- En este canal se registra la radiación que proviene del disco solar con una longitud de onda de $\lambda = 4 \text{ cm}$. La estructura a bloques de este canal se puede ver en la figura 2.4 Este canal está provisto de un generador de ruido (G.R.1) que se conecta al amplificador (A) alternadamente con la señal del Sol. El objetivo es que el receptor cuente con un sistema que ayude a disminuir el efecto de las variaciones de ganancia de los amplificadores debidas, por ejemplo,

2.5. MICROONDAS DE REGIONES ACTIVAS SOLARES OBTENIDAS CON EL RADIOINTEI

a variaciones de temperatura o de voltaje, teniendo un registro que pueda ser lo más confiable posible.

Para que la señal de la fuente y la constante conocida, en este caso llamada "ruido 2" pasen alternadamente a las guías de onda, se coloca un embobinado sobre una guía de onda circular. A esta guía de onda entran las señales de G.R.I. y del Sol. Al circular la corriente por la bobina se genera un campo magnético que está calculado para hacer girar la polarización lineal de la señal en un ángulo de 90° mediante el efecto Faraday. La señal producida por el generador de señal de modulación de intensidad, la cual proporciona una señal cuadrada de 600 Hz, entra al amplificador sensible a la fase para saber cuándo está recibiendo la señal proveniente de la antena y cuando la señal proveniente del generador de ruido 2. La señal resultante de la resta, entra por un lado al registro analógico para ser graficada en papel en el graficador de intensidad.

3. Canal de Polarización.- El radiointerferómetro solar capta dos tipos de señales, una es la señal de polarización circular derecha (PCD), y la otra es la polarización circular izquierda (PCI). Los circuitos están diseñados para registrar la resta de las dos señales polarizadas (PCD y PCI), y de esta manera se obtiene un registro de la polarización circular media. La detección de las dos polarizaciones se lleva a cabo de la siguiente manera: en la antena llegan señales tanto de ondas de PCD como de PCI y, a la entrada de las guías de onda circular también se considera que llegan ese mismo tipo de ondas. Se coloca en la entrada de las guías de onda circular en cada una de las antenas, una placa retardadora (o fásica) de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda que tiene por objetivo lograr que la señal de polarización circular derecha (PCD) y la izquierda (PCI) sea transformada en polarización lineal. La polarización lineal producida por PCI es perpendicular a la producida por la PCD.

La placa retardadora o fásica se coloca a 45° respecto al lado corto de esta guía de onda. Después de la placa retardadora o fásica se encuentra el modulador de polarización y enseguida se encuentra la guía de onda rectangular la cual lleva la señal hacia el anillo híbrido en donde se suman las dos señales. En el modulador de polarización se usa el efecto Faraday para girar 90° los ejes de polarización de las dos señales, para que de esta manera solamente una señal que proviene de las ondas PCD y PCI, pasará a la vez.

El control del modulador de polarización se lleva a cabo con un generador de onda cuadrada, la cual es enviada al amplificador tipo lock-in de polarización para poder hacer la resta de las señales de PCD y PCI. El amplificador de tipo lock-in tiene dos salidas de señal, una para el amplificador analógico y otra para el procesamiento digital de la señal. De esta manera se obtiene una gráfica de la señal en papel y el registro y almacenamiento de la señal en forma digital en un disco o cinta.

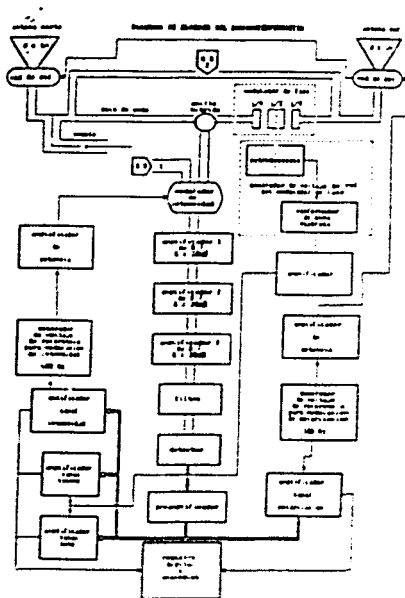


Figura 2.5: Estructura a bloques del radiointerferómetro

2.5. MICROONDAS DE REGIONES ACTIVAS SOLARES OBTENIDAS CON EL RADIOINTE

4. Canal de interferometría.- En el interferómetro la fase de uno de los elementos es invertida periódicamente y la salida del receptor es invertida en sincronía (Kraus, 1966), es por eso que, el interferómetro es de fase conmutada (multiplicación).

La señal de la antena norte pasa directamente al anillo híbrido, pero antes de que la señal proveniente de la antena sur se mezcle con la señal de la antena norte, se encuentra el modulador de fase, el cual es el que se encarga de insertar y quitar media longitud de onda en la guía de onda de transmisión de uno de los elementos, para que posteriormente pase al anillo híbrido. El esquema del canal de interferometría se ve en la figura 2.5.

2.5.4 Modulador de fase

El modulador de fase está compuesto por tres placas retardadoras, las cuales se encuentran dentro de las guías de ondas circulares. Las señales que llegan a la guía de onda circular están linealmente polarizadas, es decir tomamos las componentes del vector eléctrico de dicha señal como E_{0x} y E_{0y} [en realidad $E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t + \phi)$ y también $E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi)$]

La primera placa que encuentra la señal polarizada está con su eje a 45° con respecto al lado corto de la guía de onda rectangular que antecede al modulador de fase, de tal forma que al cruzar la señal por esta primera placa retardadora de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda cambia su polarización lineal

$$E_{0x} = E_{0y} \quad (2.19)$$

en polarización circular

$$E_{0x} = E_{0y} + \frac{\pi}{2} \quad (2.20)$$

Después las ondas con polarización circular pasan a través de la segunda placa retardadora de media longitud de onda. En esta etapa se conserva la polarización circular, ya que el eje de la placa de media longitud de onda gira con una frecuencia de ω , tal como cuando coincide con el eje de la placa anterior de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, las ondas tienen un retraso en fase de π rad, esto es de la siguiente manera:

$$E_{0x} = E_{0y} = \frac{3\pi}{2} \quad (2.21)$$

y por tanto se conserva la diferencia de fase de $\frac{\pi}{2}$ entre las componentes del campo eléctrico, entonces

$$E_{0x} + \pi = E_{0y} + \frac{\pi}{2} \quad (2.22)$$

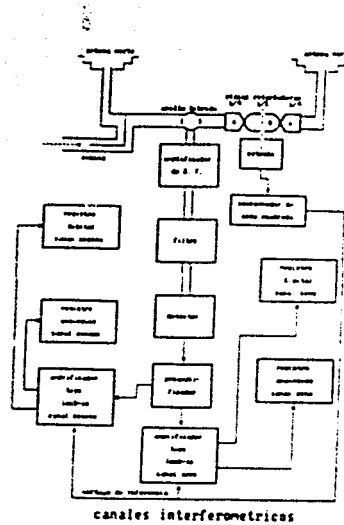


Figura 2.6: Canal de interferometria

2.5. MICROONDAS DE REGIONES ACTIVAS SOLARES OBTENIDAS CON EL RADIOINTE

aunque el sentido de la polarización se invierte.

Posteriormente se encuentra una placa retardadora de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda la cual tiene su eje alineado con la primera placa retardadora ($\frac{1}{4}$ de longitud de onda), la cual hace nuevamente que la polarización sea lineal, para salir así del modulador de fase.

Después de pasar por el modulador de fase, la señal proveniente de la antena sur se encuentra dos veces en fase con la señal de la antena norte lo cual produce interferencia constructiva, y también la señal se encuentra dos veces fuera de fase, lo cual produce interferencia destructiva, evitando así que se formen lóbulos interferenciales estacionarios con los cuales se vería sólo una región del Sol (el centro del máximo principal), sino que tenemos lóbulos interferenciales viajeros, es decir un patrón de interferencia que viaja, el cuál permita observar regiones adyacentes a la región del máximo principal.

La información de la intensidad y posición de los centros de actividad con respecto al centro del disco solar, se obtiene al registrar la señal en diferentes posiciones del patrón. A la posición del patrón de interferencia en que el máximo del lóbulo principal se encuentra en el origen de fase se le llama +coseno, y a la posición en el que el mínimo del patrón coincide con el centro de fase se le llama -coseno, y cuando es la mitad del máximo principal del patrón de interferencia la que coincide con el centro de fase se le llama +seno del lado izquierdo y -seno del lado derecho.

La señal interferométrica se separa en dos canales, en uno se graba la señal registrada durante las posiciones coseno y en otro se graba la señal registrada durante las posiciones seno. Mediante un amplificador tipo lock-in se hace la resta de la señal +coseno menos -coseno, para grabarlas en el registro correspondiente. Análogamente hace el canal seno que registra la fase o posición de dichos centros. Para conocer la fase de la señal que llega al anillo híbrido se crean pulsos que pasan a través de un circuito que los transforma en onda cuadrada la cual se divide en dos y entra como referencia de fase a los amplificadores tipo lock-in de los canales seno y coseno. El objetivo de tener ondas cuadradas es controlar la entrada de la señal alternadamente a los canales seno y coseno, sincronizando así las posiciones del patrón seno y coseno con las entradas a los canales seno y coseno respectivamente.

Finalmente la señal sale al registro digital y analógico de cada canal.

50 *CAPÍTULO 2. EMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA Y CORPUSCULAR DURANTE RÁFAGA*

Capítulo 3

Análisis de SEP y su relación con rayos gamma, microondas y EMC durante el máximo solar 1991-1992.

En el análisis siguiente se utilizan como base, los datos en la radiación en microondas registrados por el radiointerferómetro solar de base pequeña (RISBP), el cual se encuentra en el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M. con el fin de obtener una relación con otro tipo de datos tales como son los rayos gamma, eyecciones de masa coronal (EMC) y las partículas energéticas (SEP). Los datos obtenidos de los cuatro tipos de emisión de la presente tesis fueron extraídos de diferentes fuentes, es por eso que a continuación se dará una breve descripción de dónde se obtuvieron.

3.1 Datos de los eventos

Como aún no es posible llegar hasta el Sol y tomar muestras en forma directa, se han construido y perfeccionado aparatos que, gracias al desarrollo tecnológico, hoy se encuentran tanto en la Tierra como en el espacio interplanetario registrando datos que pudieran dar información acerca del Sol y del universo que nos rodea.

A continuación se dará un breve resumen de donde se obtuvieron los datos así como los aparatos que se utilizaron para obtenerlos.

3.1.1 Microondas

Las radiación que capta el RISBP es girosincrotrónica en las frecuencias de microondas, y de este tipo de radiación fueron detectados 71 eventos de ráfagas solares durante el período de observación del 15 de Marzo de 1991 al 13 de Mayo de 1992. Los datos de microondas fueron extraídos de la tesis de maestría del Dr. Alejandro Lara y la utilizaré para hacer el presente análisis. Estos datos se muestran en la tabla 3.1.

52 CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP_s Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDA

Ev.	Fecha	Tiemp U.T.	Energía		T	Flujo (sfu)	Indice espec.		Pol. Mex.
			I	V	K		γI	γV	
1	15-3-91	18:05	37.83	15.42	352.0	978.91	-0.85	-0.41	0
2	15-3-91	20:37	26.08	37.52	445.0	3773.13	-0.59	-0.94	11
3	15-3-91	22:27	576.65	143.31	1578.0	6583.68	-1.42	-1.02	13
4	18-3-91	17:32	71.70	57.37	298.0	1963.26	-0.32	-0.21	6
5	18-3-91	19:32	19.42	23.77	371.6	533.54	-0.51	0.11	7
6	18-3-91	20:36	169.90	74.62	449.0	3591.37	-1.07	-0.77	8
7	18-3-91	21:40	27.31	26.68	856.6	489.11	-1.38	-0.69	10
8	19-3-91	16:16	42.42	63.08	468.9		-0.70	-0.86	15
9	20-3-91	23:06	24.45	33.66	32.7		-0.56	-0.46	21
10	20-3-91	23:33	79.68	26.29	83.3		-0.73	-0.23	8
11	25-3-91	18:25	47.76	64.41	382.1	1524.98	-1.20	-0.92	31
12	25-3-91	18:58	98.18	190.91	522.7	1825.72	-1.31	-1.34	40
13	1-4-91	19:20	10.35	27.52	90.0	644.72	-0.42	-0.30	5
14	4-4-91	21:59	27.27	86.42	313.6		-0.49	-0.72	11
15	15-4-91	15:55	53.65	24.05	615.2	1391.39	-0.88	-0.33	0
16	15-4-91	19:05	31.89	29.99	407.4	994.89	-0.68	-0.76	12
17	16-4-91	15:49	40.29	32.29	400.3	278.45	-0.66	-0.98	3
18	18-4-91	18:44	30.08	31.75	230.0	795.84	-0.47	-0.88	3
19	29-5-91	23:43	110.20	75.08	1095.6	11877.50	-1.19	-0.81	2
20	30-5-91	17:41	20.05	27.04	181.7	959.29	-0.58	0.19	36
21	3-6-91	19:02	39.40	12.50	208.9	1546.00	-1.15	-0.51	1
22	5-6-91	16:32	27.72	26.64	454.1	1238.79	-0.64	-1.15	17
23	10-6-91	16:53	422.91	446.98	958.7	6060.43	-1.96	-1.40	34
24	17-7-91	21:11	31.08	56.39	798.4	1536.38	-0.86	-0.86	14
25	12-8-91	22:34	20.62	48.19	142.9	757.67	-0.57	-0.99	13
26	16-8-91	19:43	32.54	29.13	686.9	2517.78	-2.48	-1.02	3
27	22-8-91	22:01	50.54	52.09	280.0	512.87			12
28	22-8-91	22:29	90.15	67.22	407.5	924.81	-0.57	-0.86	13
29	28-8-91	18:49	30.86	77.50	146.0		-0.79	-0.65	15
30	28-8-91	22:40	37.76	86.71	180.0		-0.81	-0.60	15
31	30-8-91	23:40	81.97	154.63	361.0		-0.68	-0.51	28
32	2-9-91	22:04	28.16	67.45	134.1		-0.68	-0.60	33
33	10-9-91	21:08	51.53	215.58	267.6	840.65	-1.03	-1.20	4
34	18-9-91	17:22	19.29	47.73	163.7	276.60	-0.84	-0.37	6
35	1-10-91	18:06	42.26	35.17	311.0	472.70	-0.66	-0.13	19
36	11-10-91	20:18	39.74	38.27	135.7	395.24	-0.83	-0.38	11
37	14-10-91	17:35	107.51	169.2	165.3	1559.30	-1.71	-1.26	10
38	29-10-91	17:19	68	57	300.9	657.12	-0.89	-0.52	7

3.1. DATOS DE LOS EVENTOS

53

Ev.	Fecha	Tiemp U.T.	Energfa		T	Flujo	Indice espec.		Pol.
			I	V	K	(sfu)	γI	γv	Mex.
39	29-10-91	17:49	79	51	300.9	384.56	-0.97	-0.44	13
40	29-10-91	18:54	75	48	347.1	1521.03	-0.89	-0.35	7
41	29-10-91	20:55	407	534	678.0	692.56	-1.17	-1.19	22
42	30-10-91	19:13	93	35	300.0	2326.21	-1.17	-0.47	15
43	30-10-91	19:44	70	23	197.3	683.21	-1.29	-0.08	8
44	30-10-91	22:25	179	153	434.2		-1.31	-1.23	34
45	31-10-91	18:20	62	43	190.0	841.79	-0.87	-1.19	2
46	31-10-91	21:17	100	79	350.3	1317.99	-1.12	-0.60	11
47	5-11-91	22:06	110.822	89.81	450.8	7467.35	-1.46	-0.80	12
48	19-11-91	20:22	38.82	27.86	108.3	392.94	-1.21	-0.64	5
49	29-11-91	20:14	36.06	12.91	111.5	557.44	-1.24	-0.59	5
50	5-12-91	19:49	25.92	20.03	94.6	246.63	-0.56	-0.59	10
51	10-12-91	18:11	30.24	15.67	143.0	324.02	-0.69	-0.36	3
52	10-12-91	18:40	21.17	15.15	131.8	196.90	-0.59	-0.21	4
53	11-12-91	21:02	170.46	142.92	436.2	3089.86	-1.74	-1.38	34
54	15-1-92	18:56	31.81	23.97	148.3	845.76	-0.72	-0.72	1
55	31-1-92	19:14	109.19	98.30	508.5	3260.65	-1.44	-0.77	20
56	6-2-92	18:56	39.47	22.85	273.2	1335.52	-0.60	-0.10	18
57	11-2-92	21:21	25.81	36.6	168.5	133.85	-0.85	-0.65	13
58	13-2-92	18:43	25.15	24.93	140.9	226.94	-0.56	-0.65	10
59	14-2-92	21:44	215.05	366.49	404.3	2590.53	-0.87	-0.54	18
60	18-2-92	19:59	35.43	23.8	215.7		-0.40	0.21	15
61	19-2-92	21:18	38.66	36.21	142.8	1090.99	-0.81	-0.65	25
62	4-3-92	21:36	31	40	62.8	194.64	-0.53	-0.44	1
63	26-3-92	21:43	296.76	526.33	836.9		-1.12	-0.72	40
64	31-3-92	21:08	44	72	185.9				15
65	31-3-92	22:32	59	69	240.0		-0.52	-0.79	15
66	1-4-92	17:34	339.02	27.18	501.6	2273.98	-1.64	-0.33	3
67	15-4-92	23:34	27.98	15.05	145.4	1613.76	-0.85	-0.78	8
68	20-4-92	18:21	34.38	36.00	180.0	338.16	-0.75	-0.49	8
69	24-4-92	19:18	82.95	33.61	254.1	1185.64	-1.39	-0.46	2
70	6-5-92	22:16	27.56	36.07	130.4		-0.77	-0.67	2
71	13-5-92	20:21	28.93	17.77	152.1		-0.07	-0.22	3

Tabla 3.1: Datos registrados por el RISBP durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

54CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDAS

En la tabla 3.1, en la primera columna, Ev significa el número del evento; después esta la fecha en día, mes y año; U.T. es el tiempo universal en horas y minutos; en la columna de energía las letras I y V son la intensidad y polarización respectivamente y tienen unidades arbitrarias; después esta la temperatura de antena en grados kelvin; sfu significa unidades de flujo solar, una unidad de flujo solar es igual a $10^{-22} \text{ Wm}^2 \text{ Hz}^{-1}$; siguen los índices espectrales γI y γV para la intensidad y la polarización respectivamente; y por último pol quiere decir el grado de polarización de la radiación durante el máximo del evento.

3.1.2 Rayos gamma

Los rayos gamma provenientes de las ráfagas solares, no penetran tan fácilmente la atmósfera terrestre, y es por eso que son detectados en el espacio interplanetario utilizando los satélites e incluso los cohetes espaciales para poder realizar estudios sin la influencia de la atmósfera terrestre. El caso de los datos observados en rayos gamma por los observatorios Granat son uno de ellos.

El Granat es un satélite que fue lanzado al espacio interplanetario a bordo del cohete espacial ruso "PROTON" el primero de Diciembre de 1989, estuvo operando casi 9 años, ya que en Noviembre de 1998 dejó de funcionar. El Granat fue un proyecto ruso en colaboración con algunos países europeos para poder hacer estudios y poder tener registros de la emisión electromagnética que se encuentra en el medio interplanetario. Para poder hacer las observaciones llevo a bordo siete instrumentos diferentes que podían detectar emisión electromagnética en el rango de los rayos x y de rayos gamma, los cuales son:

1. Telescopio de rayos x (SIGMA)
2. Telescopio de rayos x (ART-P)
3. Espectrómetro de rayos x (ART-S)
4. El instructor (WATCH)
5. Detector de rayos gamma (PHEBUS)
6. Detector de rayos gamma (KONUS-B)
7. Detector de rayos gamma (TOURNESOL)

EL Granat registro 110 datos de rayos gamma en ráfagas solares en el rango de 65 a 124 Mev durante los años de 1990 a 1995, y que sirvieron para el análisis de la presente

3.1. DATOS DE LOS EVENTOS

55

Fecha	U.T	Loc	Imp X	Cuentas (1/cm ²)	Energ (max)	Alfa	Desviación
22-03-91	20:07:58	S27-E23	M2.5	20	3	3.1	0.1
22-03-91	22:42:51	S26-E25	X9.4	164	11	2.6	0.1
29-03-91	06:44:59	S28-W60	X2.4	165	7	2.9	0.2
31-03-91	13:45:30		C5.2	47	4	2.6	0.2
31-03-91	19:08:38	S22-W38	X1.0	250	10	3.3	0.1
14-05-91	08:47:23	N30-W58	M8.9	20	4	2.7	0.1
17-05-91	09:03:44	N29-W73	M3.3	15	2	4.1	0.4
28-05-91	07:26:21	N08-E51	M3.2	16	2	3.4	0.2
28-05-91	10:17:52	N08-E57	M6.3	22	3	3.0	0.2
31-05-91	16:53:41	S08-E09	M2.5	100	7	3.7	0.2
1-06-91	14:55:53	N25-E90	X12.0	370	8	3.6	0.1
10-06-91	02:27:27	N31-W10	M4.5	44	1	3.7	0.5
10-06-91	13:55:19	N29-W21	M6.4	62	2	3.6	0.3
10-06-91	16:53:30	N35-W11	M3.2	40	3	3.9	0.4
11-06-91	01:53:25	N31-W17	X12.0	257	7	3.9	0.2
26-06-91	20:13:20		C2.9	8	6	2.9	0.1
30-06-91	02:56:07		M5.0	38	9	2.3	0.2
13-07-91	19:37:58	S24-W06		1	1	4.2	0.5
17-07-91	06:25:49	S22-E43	X1.1	12	4	3	0.2
20-07-91	01:37:48	N05-E50	X1.0	9	2	2.8	0.3
25-08-91	09:36:25	N24-E70	M1.3	3	1	2.7	1.3
7-09-91	19:23:04	S11-W50	X3.3	8	2	2.8	0.3
13-10-91	18:09:49	N22-E82	M6.0	6	2	2.4	0.3
13-10-91	21:02:34	N23-E79	M1.1	8	2	3.6	0.5
14-10-91	17:34:33	S24-E34	M6.6	8	2	2.9	0.3
26-10-91	20:35:18	S09-E20	X1.7	8	3	2.8	0.3
14-12-91	20:55:02		M2.0	8	4	2.3	0.3
15-12-91	06:23:41		M1.4	8	3	2.4	0.2
15-12-91	11:41:18	S10-E78	C8.6	10	2	2.9	0.2
20-12-91	14:02:29	S15-E64	X3.6	50	6	2.8	0.1
26-01-92	15:27:47	S16-W66	X1.0	17	4	2.6	0.2
30-01-92	09:26:04	S03-W06	M4.9	10	2	3.8	0.3
5-02-92	13:16:18	S15-W26	M2.2	6	1	4	0.6
6-02-92	18:55:30	S15-W43	M5.6	7	1	4	0.7
7-02-92	11:54:15	S20-W53	M3.7	20	2	3	0.3
8-02-92	03:21:11	S15-W38	C7.6	16	1	4.3	1
11-02-92	04:22:31	S13-W86	M1.8	157	11	2.2	0.2
14-02-92	23:07:22	S12-E02	M7.0	21	2	3.6	0.2
15-02-92	21:29:26	S16-W13	M5.5	5	2	2.5	0.3
16-02-92	12:32:56	S13-W17	X1.4	28	6	3	0.1
24-04-92	19:18:17	N13-E00	M1.2	6	1	3.1	0.4

Tabla 3.2: Datos de rayos gamma detectados por el observatorio GRANAT que están dentro del periodo de observación de microondas.

56CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDAS

tesis, pero solamente fueron utilizados los que corresponden al período de observación de los datos en microondas.

En la tabla 3.2 se muestran los eventos de rayos gamma que se encuentran dentro del período de observación de los eventos de microondas. Como se puede ver en la tabla, en la primer columna se encuentra la fecha, en la siguiente columna el tiempo universal e horas, minutos y segundos; posteriormente se encuentra loc significa localización, que es el lugar en donde ocurrió la ráfaga y se da en coordenadas heliográficas; Imp X es la importancia del evento en rayos x y se clasifica de acuerdo al pico de energía en W/m^2 de la ráfaga. Tiene la forma Zn en donde Z es:

- A - $< 10^{-7}$
- B - $> 10^{-7}, < 10^{-6}$
- C - $> 10^{-6}, < 10^{-5}$
- M - $> 10^{-5}, < 10^{-4}$
- X - $> 10^{-4}$

Y la letra n va del 1 al 9. Así por ejemplo para el primer evento, M2.5 quiere decir un flujo pico de $2.5 \times 10^{-5} W/m^2$; después se encuentra alfa que es la pendiente de la recta de la gráfica logarítmica (índice espectral), y por último la columna de la desviación es la incertidumbre de la alfa.

3.1.3 Eyecciones de masa coronal (EMC)

Observaciones hechas por coronógrafos a bordo de satélites muestran que cuando ocurre una ráfaga solar, a veces se observan EMC. Pero no solo en el medio interplanetario son observadas ya que también se pueden detectar aquí en la Tierra, tal es el caso del Mauna Loa Solar Observatory (MLSO) que se encuentra en la isla de Hawai, y es operado por el High Altitude Observatory (HAO), una división del National Center for Atmospheric Research (NCAR), que se encuentra localizado en Boulder, Colorado, y que es patrocinado por el National Science Foundation (NSF). La corona solar es observada con un ancho de banda de 700 a 1080 nm. El disco solar y el limbo son registrados el la línea de emisión H-alfa a 656.3 nm, y en la del helio-I en la línea de 1083 nm.

El Mauna Loa Solar Observatory complementado con el HAO registró 75 EMC durante el período de 1991 a 1994, de las cuales solamente son utilizadas las que corresponden al período de observación de las microondas, y se muestran en la tabla 3.3, en la que se ve, que en la primer columna se encuentra la fecha, en las siguientes dos columnas el tiempo universal inicial y final en horas y minutos, y la última columna es la posición angular en que se observó al evento.

3.1. DATOS DE LOS EVENTOS

Evento	Tiempo inicial T.U.	Tiempo final T.U.	Posición deg
04-03-91	19:00	20:30	50-120
05-03-91	17:35	18:42	80
24-05-91			260
25-05-91	17:16	17:55	280
25-05-91	18:04	18:46	280-N
30-05-91	19:41	20:16	80-120
20-06-91	19:46	20:03	300
23-06-91	18:39	19:27	280
02-07-91	19:33	20:02	65
13-07-91	18:29	19:35	80-110
18-07-91			
26-07-91	19:02	20:49	300
03-08-91	b17:18	18:10	120
03-08-91	18:42	19:25	300
15-08-91	b18:16	19:32	105
18-08-91	b19:32	a19:45	85
28-08-91			284
08-09-91	20:39	21:44	280
08-09-91			110
25-10-91	18:25	19:56	150
09-11-91	17:46	18:41	260
09-11-91	20:48	21:10	280
21-11-91	18:43	19:34	230-260
04-12-91	18:36	20:45	80
04-12-91	20:25	21:59	300
10-12-91			235-270
17-12-91	19:36	20:25	265
01-01-92	20:29	20:52	260
04-01-92	19:00	21:00	W limb
06-01-92	20:00	20:40	265
09-01-92	19:53	20:25	280
09-01-92	20:28		275
12-01-92	20:23	21:00	140
22-01-92	21:32	22:00	160
23-01-92			
19-02-92	19:26	19:51	250-260
22-02-92	21:09	21:44	E limb

58CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDAS

Fecha	Tiempo inicial T.U.	Tiempo final T.U.	Posición angular (grados)
01-04-92	17:39	18:11	150-170
04-04-92	18:28	20:00	115
04-04-92	19:29	21:44	300
16-04-92	19:49	20:32	100-120
17-04-92	19:00	19:32	E limb-65
17-04-92	20:18	20:31	110
04-05-92	21:17	21:58	SE limb
08-05-92	18:53	19:42	250-280

Tabla 3.3: Datos de EMC detectados por el MLSO, durante el periodo de observación de microondas.

Fecha (comenzó)	Tiempo U.T.	Fecha (máximo)	Tiempo U.T.	Flujo (pfu $\alpha > 10$ Mev)	Fecha	Tiempo T.U.	Loc
23-03-91	8:20	24-03-91	03:50	43000	22-03-91	22:47	S26-E28
29-03-91	21:20	30-03-91	03:30	20			
3-04-91	8:15	4-04-91	10:00	52	2-04-91	23:27	N14-W00
13-05-91	3:00	13-05-91	09:10	350	13-05-91	01:44	S09-W90
31-05-91	12:25	1-06-91	04:45	22			
4-06-91	8:20	11-06-91	14:20	3000	4-06-91	03:52	N30-E70
14-06-91	23:40	15-06-91	19:50	1400	15-06-91	08:21	N33-W69
30-06-91	7:55	2-07-91	10:10	110	28-06-91	06:26	N30-E85
7-07-91	4:55	8-07-91	16:45	2300	7-07-91	02:23	N26-E03
11-07-91	2:40	11-07-91	04:50	30	10-07-91	12:28	S22-E34
11-07-91	22:55	12-07-91	02:05	14			
26-08-91	17:40	27-08-91	18:30	240	25-08-91	01:15	N25-E64
1-10-91	17:40	1-10-91	18:10	12	29-09-91	15:33	S21-E32
28-10-91	13:00	28-10-91	14:40	40	27-10-91	05:48	S13-E15
30-10-91	7:45	30-10-91	18:10	94	30-10-91	06:34	S08-W25
7-02-92	6:45	7-02-92	11:15	78	6-02-92	10:48	S13-W10
16-03-92	8:40	16-03-92	08:10	10	15-03-92	01:54	S14-E29
9-05-92	10:05	9-05-92	21:00	4600	8-05-92	15:46	S26-E08

Tabla 3.4: Datos de protones detectados por el GOES que están dentro del periodo de observación de microondas.

3.1.4 Partículas energéticas (SEP)

Cuando ocurre una ráfaga solar o una EMC también existe la emisión de partículas energéticas (protones, electrones, etc.) solares, también llamados SEP, las cuales viajan por el medio interplanetario y llegan a la Tierra unas horas después de haberse suscitado la ráfaga o la EMC. El flujo de partículas que se recibe en la cima de la atmósfera terrestre, se puede detectar para que se puedan hacer estudios más precisos, a bordo de los satélites o cohetes espaciales al igual que los rayos gamma. Tal es el caso de los datos de las partículas energéticas (protones) detectados a bordo de la familia de satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), los cuales dan servicios meteorológicos a los Estados Unidos de América ya que se encuentran continuamente monitoreando la Tierra y su entorno.

Los satélites GOES son operados por el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Estos datos son extraídos de los listados publicados por el Solar- Geophysical Data, que registro 25 eventos de 1991 a 1993, de los cuales solamente se tomaron los datos del período de observación de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, como se puede ver en la tabla 3.4. en donde se observa que, en la primera columna se encuentra la fecha, en la segunda columna el tiempo universal cuando el evento inicio y esta en horas y minutos; la tercera y cuarta columna se encuentra la fecha y el tiempo universal respectivamente cuando el evento tuvo su máximo. Posteriormente se encuentra el flujo de esta corriente de partículas. En las siguientes dos columnas se encuentra la fecha de asociación con ráfaga y región activa y el tiempo universal respectivamente que se da en horas y minutos. Y en la última columna esta la localización en coordenadas heliográficas.

3.2 Eventos asociados

Como se puede ver en la tabla 3.1, hubo 71 eventos de microondas entre Marzo de 1991 y Mayo de 1992, de los cuales, en esas fechas hubo 3 eventos asociados con EMC, es decir el 4.2 %, con SEP hubo 4 eventos asociados, es decir el 5.6 %, y 7 que estuvieron asociados con rayos gamma, es decir el 9.8 %. En la figura 3.1 se puede ver esta relación.

Hubo 110 eventos de rayos gamma registrados por el GRANAT en el periodo de 1991 y 1993, de los cuales en fecha hubo 4 eventos que estuvieron asociados con EMC, es decir el 3.6 %, con SEP fueron 12, es decir el 10.9 %, y con microondas son 9 que corresponde al 8.2 %.

Se estudiaron 16 eventos de rayos gamma en el periodo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, de los cuales en fecha hubo 1 evento asociado con EMC, es decir el 2.2 %, con

60CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDAS

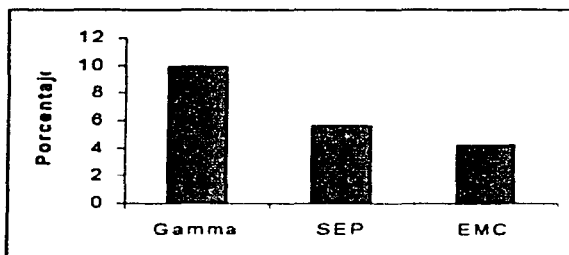


Figura 3.1: Distribución porcentual de eventos asociados por día con eventos de microondas durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

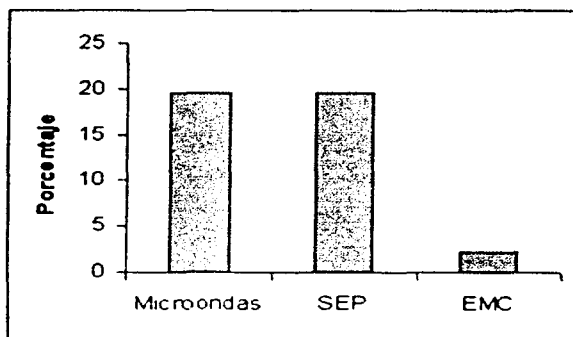


Figura 3.2: Distribución porcentual de eventos asociados por día con rayos gamma durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

SEP fueron 9 que corresponde al 19.6 %, y con microondas hubo 9 eventos asociados, es decir el 19.9 %. En la siguiente figura 3.2 se muestra esta relación.

Existieron 75 eventos de EMC entre 1991 y 1994, de los cuales por fecha hubo 4 eventos asociados con SEP, es decir el 5.3 %, con rayos gamma también fueron 4 eventos, es decir el 5.3 %, y con microondas fueron 5, es decir el 6.6 %.

De esos 75 eventos de EMC, sólo 45 están entre Marzo de 1991 y Mayo de 1992 (tabla 3.3), de los cuales por fecha hubo sólo un evento asociado con rayos gamma, es decir el 2.2 %, hubo 2 que están asociados con SEP, es decir el 4.4 %, y con microondas hubo 3 eventos asociados, es decir el 6.6 %. En la siguiente figura 3.3 se muestra esta asociación.

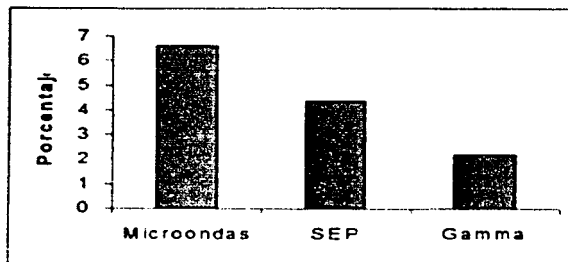


Figura 3.3: Distribución porcentual de eventos asociados por día con EMC durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

62CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDAS

Existieron 25 eventos de SEP entre 1991 y 1993, de los cuales por fecha hubo 3 eventos asociados con EMC, es decir el 12 %, con microondas fueron 4 eventos, es decir el 16 %, y con gamma fueron 8 eventos asociados, es decir el 32 %.

De esos 25 eventos, sólo 18 se encuentran entre Marzo de 1991 y Mayo de 1992 como se ve en la tabla 3.4, de los cuales por fecha hubo 2 eventos asociados con EMC, es decir el 11.1 %, con microondas fueron 4 eventos, es decir el 22.2 %, y 9 eventos asociados con rayos gamma, es decir el 50 %. En la figura 3.4 se muestra esta relación.

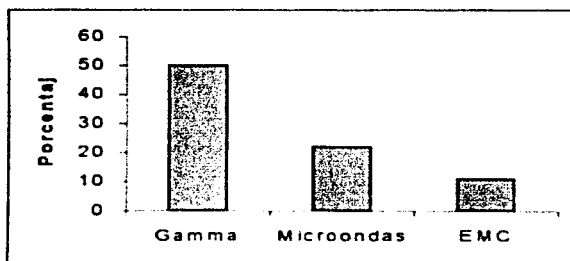


Figura 3.4: Distribución porcentual de eventos asociados por día con SEP durante Marzo de 1991 y Mayo de 1992.

Se procede ahora a sacar la frecuencia por mes de los eventos que se encuentran en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992 resultando la siguiente tabla 3.5 en la que se puede ver que existen 71 eventos de microondas, 46 de rayos gamma, 45 de eyecciones de masa coronal, y 18 eventos de partículas energéticas.

3.2. EVENTOS ASOCIADOS

63

Mes	Microondas	Gamma	EMC	SEP
Marzo	12	10	2	2
Abril	6	0	0	1
Mayo	2	5	4	1
Junio	3	7	2	3
Julio	1	3	4	4
Agosto	7	1	5	1
Septiembre	3	1	2	0
Octubre	12	4	1	3
Noviembre	3	0	3	0
Diciembre	4	4	4	0
Enero	2	2	8	0
Febrero	6	8	2	1
Marzo	4	0	0	1
Abril	4	1	6	0
Mayo	2	0	2	1
Número de eventos	71	46	45	18

Tabla 3.5: Frecuencia por mes de los eventos en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

En la figura 3.5 se puede observar esta frecuencia por mes de los diferentes tipos de emisión y se compara con la frecuencia de las manchas solares para poder ver que tanto varían estas emisiones.

Posteriormente se elabora la tabla 3.6, en la que se ven los eventos asociados por fecha (día, mes, año), en el intervalo que abarcan las microondas.

Como se puede ver en la tabla 3.6, en la primer columna se encuentra la fecha que esta en día, mes y año. Posteriormente están las columnas de microondas, rayos gamma, EMC y SEP, junto con el tiempo universal que le corresponde a cada evento. De esta tabla existen 24 días entre Marzo de 1991 y Mayo de 1992 en los que hubo eventos relacionados por fecha con cualquier tipo de emisión, de los cuales 6 son de EMC, es decir el 25 %, con microondas son 13, es decir el 54.1 %, con SEP son 14, es decir el 58.3 %, y 16 con rayos gamma, es decir el 66.6 %. En la figura 3.6 se puede ver esta relación.

64CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE SEP Y SU RELACIÓN CON RAYOS GAMMA, MICROONDA

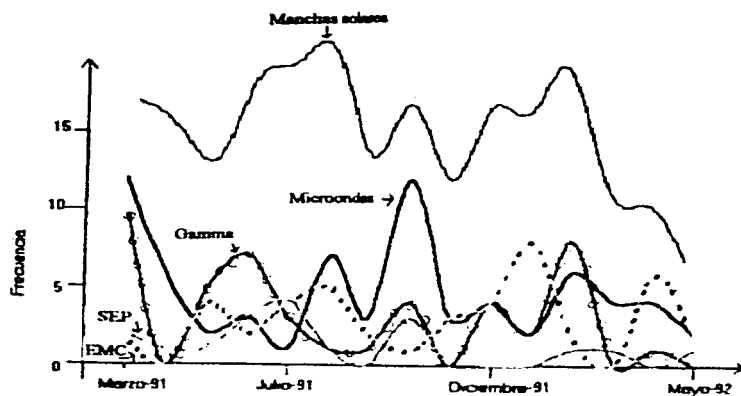


Figura 3.5: Frecuencia por mes de la emisión durante el periodo de observación y su relación con el ciclo solar.

Fecha	Microondas T.U.	Rayos Gamma U.T.	EMC U.T.	SEP U.T.
22-03-91		20:07:59-22:42:51		22:47
29-03-91		8:44:19		21:20
4-04-91	21:59			10:00
30-05-91	17:41		19:41-20:16	
31-05-91		16:53:41		12:25
1-06-91		14:58:53		4:45
10-06-91	16:53	2:27:27-13:55:19-16:53:30		
11-06-91		1:53:25		14:20
30-06-91		2:56:07		7:55
2-07-91			19:33-20:02	10:10
13-07-91		19:37:58	18:29-19:35	
17-07-91	21:11	06:25:49		
25-08-91		9:36:25		1:15
1-10-91	18:06			17:40 -18:10
14-10-91	17:35	17:34:33		
30-10-91	19:13-19:44-22:25			7:45-08:10-6:34
6-02-92	18:56	18:55:30		10:48
7-02-92		11:54:15		6:45-11:15
11-02-92	21:21	04:22:31		
14-02-92	21:44	23:07:22		
19-02-92	21:18		19:26-19:51	
1-04-92	17:34		17:39-18:11	
24-04-92	19:18	19:18:17		
8-05-92			18:53-19:42	15:46

Tabla 3.6: Eventos asociados con cualquier tipo de emisión por fecha en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

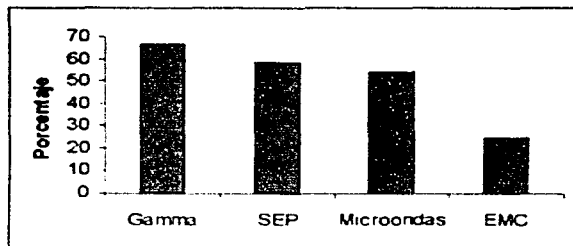


Figura 3.6: Distribución porcentual de eventos asociados por fecha con cualquier tipo de emisión durante Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 4

Resultados

La recopilación de los datos y obtención de resultados para esta tesis se ha hecho de la siguiente manera:

En el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, se construyeron cuatro tablas; una conteniendo 71 eventos de microondas (tabla 3.1) detectados por el RJSBP, en la cual se seleccionan los eventos que tienen la misma fecha con algún otro tipo de emisión, obteniendo la figura 3.1, en la que se ve que las microondas estuvieron más asociadas con gamma, después SEP y por último con EMC. La siguiente tabla 3.2, contiene 46 eventos de rayos gamma que fueron detectados por el satélite Granat, en la que se seleccionan los eventos que tienen la misma fecha con algún otro tipo de emisión, obteniendo la figura 3.2, y en la que se ve que los rayos gamma tuvo la misma asociación con SEP y microondas, y con EMC fue muy poca. La tercera tabla 3.3, contiene 15 eventos de EMC registrados por el Mauna Loa Solar Observatory (MLSO), en la que se seleccionan los eventos que tienen la misma fecha con algún otro tipo de emisión, obteniendo la figura 3.3, y en la que se ve que las EMC tuvieron mayor asociación con microondas, después con SEP y por último gamma. Y finalmente la tabla 3.4, la cual contiene 18 eventos de partículas energéticas registradas según el Solar-Geophysical Data, que afectaron el medio terrestre, los cuales se conocen como SEP, y otra vez, se seleccionan los eventos por fecha con cualquier tipo de emisión, obteniendo la figura 3.4, en la que se ve que los SEP tuvieron mayor asociación con gamma, después con microondas y por último EMC.

Posteriormente, de la tabla 3.5, se grafica la frecuencia de eventos de estos cuatro tipos de emisión en el intervalo mencionado y se compara con el ciclo de actividad solar obteniendo la figura 3.5. Se encontró que los 4 tipos de emisión siguen más o menos el ciclo de manchas solares.

Con el fin de ver los diferentes tipos de emisión asociados, se construye la tabla 3.6 con aquellos días para los cuales ocurrieron al menos dos tipos de emisión. De esa manera se pudo obtener la figura 3.6, en la que se ve que los rayos gamma tuvieron una mayor asociación, después los SEP, microondas y EMC.

	SEP	Microondas	Gamma	EMC
SEP	18	1	6	1
Microondas	1	71	4	1
Gamma	6	4	46	0
EMC	1	1	0	45

Tabla 4.1: Eventos asociados con cualquier tipo de emisión en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

Entonces, a partir de esa tabla 3.6, se busca una asociación de eventos de microondas, rayos gamma, EMC y SEP que se cree están relacionados con algún evento que ocurrió en el Sol, como puede ser una ráfaga o una eyección de masa coronal, con la siguiente consideración:

Los rayo gamma y las microondas son energía electromagnética y como mencione en el capítulo 2, esta emisión no se ve afectada por los campos electromagnéticos del Sol, llegando a la Tierra 8.5 minutos después de producirse, la cual se genera segundos después de ocurrida la ráfaga. Es por eso que el evento de rayo gamma y microondas debe coincidir en tiempo universal con una diferencia de unos segundos solamente.

Las EMC deben coincidir con una diferencia de hasta 1 hora, ya que cuando ella ocurre, solamente se observa en el limbo y para eso estas eyecciones ya recorrieron algunos kilómetros.

Y por último los SEP por ser emisión corpuscular tiene masa y carga eléctrica, por lo tanto su aceleración es afectada por las fuerzas electromagnéticas del Sol frenando a las partículas, y por consiguiente llegan a los entornos de la Tierra tiempo después de ocurrida la ráfaga. Es por eso que los SEP deben de ocurrir no más tarde de 13 horas.

Con el criterio anterior se obtiene la tabla 4.1 en la que se puede observar que, en el periodo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, hubo las siguientes relaciones:

De los 18 eventos de SEP hubo 6 que tuvieron asociación con rayos gamma, es decir el 33.3 %, con microondas y EMC fue solamente uno, es decir el 5.5 %. La figura 4.1 muestra esta asociación.

De los 71 eventos de microondas hubo 4 que estuvieron relacionados con gamma, es decir el 5.6 %, con EMC y SEP fue solamente uno, es decir el 1.4 %. En la figura 4.2 se muestra esta asociación.

De los 46 eventos de rayos gamma hubo 6 que están asociados con SEP, es decir el 13 %, con microondas son 4, es decir el 8.7 %, Y con EMC no existió alguno asociado. En la figura 4.3 se ve esta asociación.

De los 45 eventos de EMC hubo solamente uno asociado con microondas y SEP, es decir el 2.2 %, y con rayos gamma no hubo alguno asociado. En la figura 4.4 se ve esta asociación.

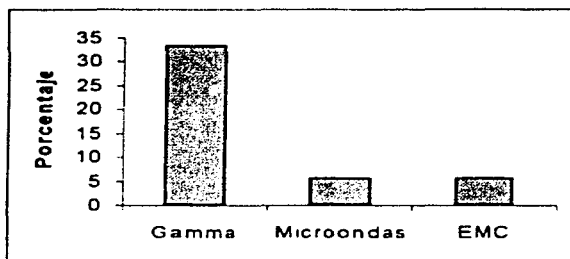


Figura 4.1: Distribución porcentual de eventos asociados con SEP.

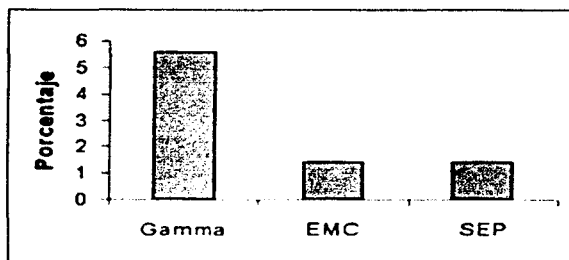


Figura 4.2: Distribución porcentual de eventos asociados con microondas.

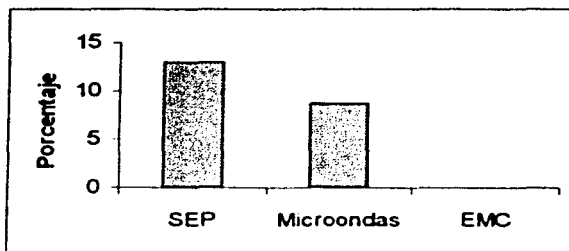


Figura 4.3: Distribución porcentual de eventos asociados con gamma.

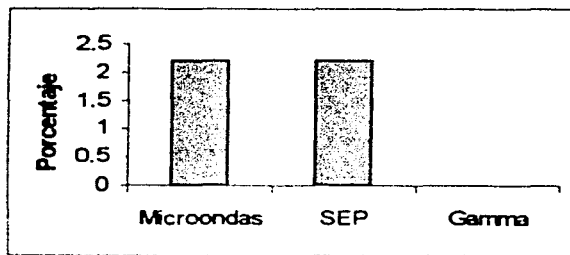


Figura 4.4: Distribución porcentual de eventos asociados con EMC.

De la tabla 4.1 existieron 11 días entre Marzo de 1991 y Mayo de 1992 en los que hubo eventos asociados con cualquier tipo de emisión, de los cuales 9 son de rayos gamma, es decir el 81.8 %, son 7 de SEP, es decir el 63.6 %, con microondas son 5, es decir el 45.4 %, y con EMC son 2 que equivale al 18.1 %. En la siguiente figura se muestra esta relación.

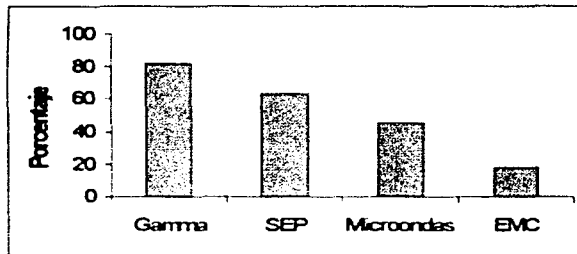


Figura 4.5: Distribución porcentual de eventos asociados con cualquier tipo de emisión en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992.

Por lo tanto, ningún evento de la base de datos utilizada en esta tesis presentó asociación con los cuatro tipos de emisión analizados, rayos gamma, microondas, EMC y SEP. Y como se puede observar tanto en la tabla 3.6 como en la tabla 4.1, solamente el evento del 6-02-92 presentó asociación con tres tipos de emisión, los cuales son microondas, gamma y SEP.

Capítulo 5

Discusión y conclusiones

5.1 Discusión

Cuando una ráfaga solar de gran magnitud tiene lugar, es acompañada a menudo de una EMC con efectos importantes sobre satélites artificiales de comunicación, sobre el campo magnético terrestre afectando la ionosfera y el suministro de energía eléctrica, e incluso pueden afectar el clima terrestre ya que el satélite SSM una de las aportaciones más significativas que hizo antes que dejara de funcionar fue el mostrar que el grado de actividad solar si puede tener repercusiones en la energía que recibimos de él y por tanto en el clima terrestre. Debido a esto, a esta fenomenología se le conoce en la actualidad como clima espacial. Es por eso que resulta de gran interés estudiar estos fenómenos solares para aprovechar los beneficios y alertando sobre los riesgos de tal energía proveniente del Sol.

El RISBP capta emisión en microondas, y tiene la ventaja de que no es necesario tener que colocarlo en el espacio, ni tampoco se necesita un cielo despejado para detectar la emisión. Esto permite llevar a cabo un monitoreo continuo de la actividad solar a un costo relativamente bajo.

En este trabajo el objetivo central es estudiar 71 eventos en microondas detectados con el RISBP en el intervalo de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, y determinar las características físicas que hacen que algunos de estos eventos estén relacionados con la emisión de rayos gamma, EMC y con la detección de SEP.

Se hace el análisis de los datos mediante la estadística al tomar los eventos de las diferentes emisiones que considere, están asociados entre sí con algún fenómeno solar.

Ahora bien, explicare que es lo que pasa cuando ocurre una ráfaga solar o una eyección de masa coronal para poder entender los resultados obtenidos, y es de la siguiente manera: cuando ocurre una ráfaga solar se aceleran a gran velocidad partículas energéticas que salen disparadas en todas direcciones, no se sabe si es simétrica o no la expulsión de estas partículas (Karlick, 1995), las cuales generan los cuatro tipos de emisión analizados en esta tesis.

En el caso de los protones acelerados que salen en dirección al interior del Sol, chocan con el plasma allí presente e interactúan con él produciendo, cuando la energía de las partículas es suficientemente grande, la fusión nuclear y en consecuencia emiten la radiación gamma. Pero como se sabe, las cargas eléctricas ejercen grandes fuerzas entre sí, que son de atracción si las cargas son diferentes y de repulsión si las cargas son iguales. Los protones que salen de las ráfagas en dirección hacia el Sol, son rápidamente detenidos por las fuerzas eléctricas que actúan entre su carga y los electrones y núcleos, principalmente los núcleos que tienen cargas eléctricas muy grandes y, como consecuencia de esto, se reduce rápidamente la energía de los protones haciendo muy difícil que se lleve a cabo la fusión (ver capítulo 2). Por lo tanto es necesario que los protones tengan una aceleración suficientemente grande al salir de la ráfaga para poder colisionar con otro protón, venciendo las fuerzas eléctricas con las que se topa en el plasma solar, emitiendo los rayos gamma, y como consecuencia de esto la temperatura se elevará aun más, por lo que los protones se fusionarán más rápidamente, y se tendrá entonces las condiciones esenciales para la propagación de una reacción en cadena. De esta manera es que, en el plasma solar, el movimiento de los protones con una aceleración suficientemente grande, irá acompañada por una emisión constante de rayos gamma, pero para que tengan esta aceleración, es necesario que ocurra una ráfaga lo suficientemente intensa como para acelerar estas partículas.

Por lo anterior se esperaría que siempre que hay eventos de rayos gamma detectados existirán eventos de microondas y SEP detectados, como se puede ver en el evento del 6-02-92 de la tabla 3.6, pero no sucede así para los otros eventos asociados con rayos gamma.

Pero no sólo la ráfaga acelera protones sino que también electrones, los cuales son atrapados por las líneas de campo magnético cromosférico, oscilando hacia atrás y hacia adelante creando ondas electromagnéticas en microondas. Estos electrones para ser acelerados lo suficiente como para emitir las microondas, no es necesario que se produzca una ráfaga intensa, ya que por ser partículas mucho más ligeras que los protones, pueden ser acelerados hasta por ráfagas pequeñas o subráfagas (ver capítulo 2). Pero en ocasiones no es necesario que ocurra una ráfaga, ya que se cree que esta emisión se produce por la contracción rápida de un campo magnético local, originando que se caliente el plasma encerrado, acelerando a los electrones que a su vez giran en las líneas de campo magnético produciendo dicha emisión. Es por eso que es llamada emisión térmica.

Es por eso que se esperaría que en los eventos relacionados, existiera un mayor número de eventos de microondas asociados con alguno de las otras emisiones, pero no sucede así como se ve en la tabla 4.1

Ahora bien, en ocasiones cuando ocurre la ráfaga salen hacia el espacio interplanetario protones con una aceleración muy grande llamados protones relativistas o ultrarelativistas, los cuales podrán "abrirse paso" a través del plasma solar venciendo las fuerzas electromagnéticas del Sol, logrando así abandonarlo. Estas partículas se clasif-

ican como SEP que, dirigidas adecuadamente podrán ser detectadas en menos de una hora después de ocurrida la ráfaga por satélites espaciales orbitando la Tierra. Estas partículas energéticas llamadas SEP pueden ser incluso, aceleradas antes de la ráfaga, pues en los últimos años se ha encontrado evidencia de que en una región activa, estas partículas pueden ser aceleradas antes de la ráfaga. Un modelo de esto es la aceleración estocástica (Pérez-Enríquez, 1991).

Pero no sólo por ráfagas este tipo de partículas pueden ser aceleradas sino también por EMC ya que, a medida que avanza una EMC puede crear una onda de choque que acelera partículas a grandes niveles de energía y aceleración. Y se ha relacionado la velocidad de estas EMC (Kahler et al, 1984) con eventos de SEP.

Detrás de la onda de choque, la nube de la EMC viaja a través del espacio interplanetario bombardeando planetas, asteroides y otros objetos con radiación y plasma. Si una EMC ocurre del lado del Sol que enfrenta a la Tierra e intercepta la trayectoria de esta, el resultado puede ser espectacular y peligroso ya que se producen tormentas geomagnéticas aquí en la Tierra afectando los satélites (ver capítulo 2).

Aunque las ráfagas y las EMC son fenómenos diferentes, en muchas ocasiones se han observado que ocurren en el mismo lugar y al mismo tiempo. Se podría pensar que las EMC "empujan" a los protones no sólo hacia afuera del Sol, sino que lo hacen en todas direcciones, y algunas de éstas partículas llegan a los entornos de la Tierra siendo detectadas por los satélites (Kahler, 1992). No se sabe con precisión si las ráfagas solares y las EMC son parte de un mismo fenómeno o si son una causa de las otras.

Esto hace pensar que al ocurrir una ráfaga intensa se captaría por lo menos las emisiones de microondas, gamma, SEP, y probablemente EMC, es decir, que al existir eventos de SEP detectados, debe forzosamente detectarse; primero eventos de rayos gamma, microondas y probablemente EMC, o segundo, eventos de EMC, pues los eventos de SEP deben tener asociación con EMC (Kahler et al., 1984), y probablemente rayos gamma y microondas.

Y también al tener datos de EMC se esperaría tener datos de SEP y probablemente de rayos gamma y microondas.

Pero como lo muestra la tabla 4.1 esto no sucede así.

Como los resultados anteriores no son del todo satisfactorios, en la tabla de microondas captados por el RUSBP, se encuentra la polarización, y tratare de encontrar una relación de ésta con los eventos asociados, ya que cuando existe un campo magnético intenso el movimiento de las partículas esta determinado por éste, es decir, se tendrá un movimiento ordenado y la polarización de la radiación emitida va a ser grande. Pero si el campo magnético es débil, el movimiento de las partículas será desordenado y la polarización decaerá. Entonces por lo general, es más probable que exista una ráfaga intensa en campos magnéticos grandes, aumentando la probabilidad de detectarse eventos de SEP, rayos gamma, microondas y probablemente EMC. Pero de la tabla 3.1 se ve que no sucede así para los dos eventos de mayor polarización, ya que

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

para el evento con mayor polarización (de 34 %) sólo está asociado con rayos gamma. Y para el otro evento con polarización alta (18 %) si se cumple la relación de tener eventos asociados de gamma y SEP.

Entonces, como los resultados anteriores no dan gran información, se propone una relación en longitud con los eventos asociados con SEP de Marzo de 1991 a Mayo de 1992, y el tiempo de retraso de éstos, resultando 7 eventos, 3 en el Este y 4 en el Oeste. Y en donde los más energéticos, de importancia x, se encuentran en longitudes de -25 y +17 grados. La siguiente figura muestra esta relación.

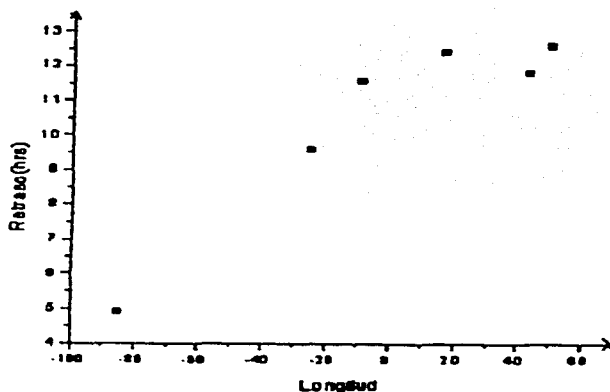


Figura 5.1: Tiempo de retraso de emisión corpuscular en relación con la localización del evento.

El comportamiento de las emisiones analizadas en esta tesis, sólo se da por la expulsión de partículas aceleradas. Pero para poder acelerarlas se necesita que ocurra una ráfaga solar, una eyección de masa coronal o un aumento de millones de grados en la temperatura.

Para poder tener una idea más clara de estos fenómenos solares y poder asociarlos de tal manera que se pueda predecir cuándo una ráfaga solar en microondas puede ir acompañada de emisión de rayos gamma, SEP, y EMC, se necesitaría hacer aquí en la Tierra, un modelo de producción de energía del plasma por fusión nuclear, que permita estudiar con detalle los fenómenos que se susciten; pues el Sol aunque es la estrella más cercana que tenemos, está muy lejos de la Tierra y no se puede hasta el momento, reducir mucho esa distancia por la gran cantidad de calor que existe al acercarse a él, haciendo muy difícil que se pueda estudiar con cierto detalle.

Es por eso que al hacer un modelo aquí en la Tierra, se pueda tal vez generalizar al Sol y a las otras estrellas, y tal vez poder predecir cuándo una ráfaga en microondas va acompañada de los otros tres tipos de emisión. Pero para lograr esto, se necesitaría altas temperaturas en el modelo para poder producir reacciones nucleares causadas por la energía térmica, y en la Tierra no existe algún recipiente de cierto material que pueda resistir las altas temperaturas que se necesitan para poder llevar a cabo esto. Solamente así, imaginando al plasma en un espacio limitado a millones de grados, se podría tal vez entender el gran problema de los fenómenos solares.

Lo que se hace actualmente es producir campos magnéticos que puedan mantener las partículas nucleares calientes en un espacio limitado y estudiar su comportamiento, pero es con ciertos límites posibles en la tierra.

5.2 Conclusiones

Las conclusiones a las que llegaron fueron las siguientes:

1. Existe un mayor número de eventos registrados de microondas (tabla 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) que de rayos gamma, SEP y EMC. Esto era de esperarse ya que por lo general la velocidad de las partículas nucleares se expresa en función de su energía, entonces los eventos menos energéticos como una subráfaga, pueden emitir con mayor probabilidad microondas y con menor probabilidad rayos gamma, EMC y SEP. Y los eventos más energéticos como las ráfagas intensas, tienen mucho más probabilidad de emitir los cuatro tipos de emisiones analizadas en esta tesis.
2. El estudio de los fenómenos solares de corta duración que se analizaron en esta tesis, varía en forma más o menos cíclica, siguiendo el comportamiento del ciclo de actividad solar como se muestra en la figura 3.5. Esto era de esperarse, ya

que por lo general, las ráfagas solares y las EMC aparecen en regiones donde se encuentran las manchas solares. Esto mismo sucede para los eventos asociados, pues todos se encuentran en latitud de -28 y $+35$ grados como se puede ver en las tablas, lo cual quiere decir que tienen un comportamiento parecido al diagrama de mariposa, como era de esperarse.

3. Es probable que los eventos de microondas por las altas correlaciones con los rayos gamma y bajas con EMC, provengan de la región activa.
4. Los rayos gamma se producen por partículas que interactúan dentro del Sol y aparentemente se originan por el mismo evento que acelera los SEP y produce las microondas (tabla 4.1) y como no hay asociación con EMC, por lo tanto es probable que los SEP detectados provengan de la cromosfera. Entonces esto hace pensar que sucede algo en la región activa que la corona aparentemente no se entera.
5. Las EMC no producen rayos gamma, y por las bajas correlaciones que existen, es probable que tampoco microondas y SEP. Entonces los SEP detectados probablemente no provengan de la corona. Esto hace pensar que sucede algo en la corona que la región activa aparentemente ni se entera.
6. De los eventos relacionados con el tiempo de retraso, se puede observar de la figura 5.1 que para esos puntos, se puede formar una recta de la forma $y = b + mx$, en donde el coeficiente de correlación es $r = 0.927$ y se puede ver que los eventos del Este tardan menos tiempo en llegar a los entornos de la Tierra que los eventos que se encuentran en el Oeste.

Con el análisis hecho a los datos obtenidos con el radiointerferómetro solar, se obtuvo de los pocos eventos asociados, que sólo el evento del 6-02-92 cumple con lo esperado, es decir al tener un campo magnético intenso, se espera tener una ráfaga intensa y producir emisión de microondas, gamma y SEP. Se observó que en general las microondas no siguen este comportamiento.

Ahora bien, como se ve que existen correlaciones muy bajas de microondas con rayos gamma, EMC y SEP no se debe descartar los siguientes factores que podrían influir en los resultados del análisis y que pueden ser:

Primero, que tanto las ráfagas como las eyecciones de masa coronal son fenómenos complejos y para un mejor análisis, se tendría que clasificar al evento en diferentes partes, por ejemplo las ráfagas deben de seleccionarse en ráfagas compactas o de doble cinta, y las EMC por su tamaño etc. Segundo, el catálogo de eventos de microondas puede tener errores, ya que por ser el RISBP un instrumento en el que sus componentes electrónicos no son con la mejor tecnología de nuestros días. Tercero, que al transportarlo desde la desaparecida Unión Soviética hasta México, y después estar sin operar un tiempo, los instrumentos electrónicos y mecánicos podrían sufrir algunos

desperfectos y por lo tanto detectarán emisión que no será muy confiable. Lo que se podría hacer es sacar datos de microondas de otra fuente de información para poder comparar y saber si son o no confiables con los datos que se trabajo.

Al hacer nuevamente el análisis de las emisiones analizadas, y considerando los factores anteriores, no cabe duda de que se reduce considerablemente los eventos asociados al grado que es difícil hacer un análisis estadístico confiable. Para tener un gran número de eventos asociados, se necesita un intervalo de tiempo mucha más grande que el que se tomó, y de esta manera se tendría un análisis estadístico mucho más confiable.

Los fenómenos analizados en la presente tesis son muy complejos, pues actualmente con toda la tecnología de "punta" utilizada para el estudio de estos eventos, no se ha podido resolver muchas incógnitas acerca de la estructura de los campo magnéticos solares, estas estructuras juegan un papel importante en la dinámica y el calentamiento de la atmósfera solar, por lo tanto, el poder resolver estas incógnitas, ayudaría mucho a crear un mecanismo que fuese aceptado en forma general, y que permita de algún modo comprender estos fenómenos solares, de los cuales sólo se esta seguro de una cosa, que están relacionados con fuerzas electromagnéticas. Y mientras más se conozca de estos eventos, se acercara más a crear un modelo aceptado en forma general que permita relacionar las diferentes emisiones que una ráfaga o una EMC son capaces de emitir, y así poder predecir con mayor probabilidad cuándo eventos de microondas detectados son acompañados de rayos gamma, EMC y SEP.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Bibliografía

- [1] Akimov, V., Ambroz, P., Belov, A.V., Berlicki, A., Chertok, I.M., Karlicky, M., Kurt, V.G., Leikov, N.G., Litvinenko, Yu, E., Magun, A., Minko-Wasiluk, A., Rompolt, B., and Somov, B.V.: 1996. *Solar Phys.* **166**, 107.
- [2] Antonucci, E., Dennis, B.R., Gabriel, A.H., and Simnett, G.M.: 1985. *Solar Phys.* **96**, 129-142.
- [3] Ballester, J.L., y Kleczek, J.: 1985. *Inves. y ciencia.* **40**, 169.
- [4] Biswas, S., and Radhakrishnan, B.: 1973. *Solar Phys.* **bf 28**, 211.
- [5] Borisovna, N.E.: 1993. *Tes. M. en C.* **24**, 88.
- [6] Borovsky, J.E.: 1983. *Phys Fluids.* **bf 36**, 2373.
- [7] Chupp, Forrest, W.J., Ryan, J.M. y col.: 1982. *Astrophys.J. Lett.* **263**, 95-99.
- [8] Chupp, E.L., Forrest, D.J., Hibbie, P.R., Suri, A.N., Tsai, C., and Cumphly, P.R.: 1973. *Nature.* **241**, 333-335
- [9] Dulk, G.A., Bastian, T.S., and Kane, S.R.: 1985. Two frequency imaging of microwave impulsive flares near the Limb, submitted to *Astrophys. J.*
- [10] Elgaroy, E.O.: 1977. *Solar Noise Storms*, Pergamon Press, Oxford.
- [11] Ellison, C.: 1991. *Relativistic Hadrons in Cosmic Ray Objects*, Zdziarski, A., y Sikova, M.(eds). en prensa.
- [12] Gilfanov, M. et al. 1991. in *Proc. Workshop on Nova Muscae*, ed. S. Brandt (Lyngby: Danish Space Research Institute), 51.
- [13] Gopalswamy, N.: 1994. in *Solar Active Region Evlution: Comparing Models with Observations*, ed.: Balasubramaniam, K.S., and Simon, G.W., *Asp Conf. Series*, vol. **68**, 395.

- [14] Harrison, R.A., Hildner, E., Hundhausen, A.J., Sime, D.G., and Simnett, G.M.: 1990. *J. Geophys. Res.* **95**, 917.
- [15] Harrison, R., Phil.: 1991. *Trans. R. Soc. Lond.* **bf 336**, 401-412.
- [16] Howard, R.A., Michels, D.J., Sheeley Jr, N.R., and Koomen, M.J.: 1982. *Astrophys. J. Lett.* **bf 263**, 1, 101.
- [17] Howard, R.A., Sheeley Jr, N.R., Koomen, M.J., and Michel, D.J.: 1985. *J. Geophys. Res.* **bf 90**, 8173.
- [18] Hundhausen, J.R., Low, B.C.: 1994. *ApJ*, **429**, 876 (Paper I).
- [19] Illing, R.M.E., and Hundhausen, A.J.: 1986. *J. Geophys. Res.* **91**, 10951-10960.
- [20] Isliker, H., and Benz, A.O.: 1994, *Astron. Astrophys.* **285**, 663.
- [21] Kahler, S.W., et al.: 1984. *J. Geophys. Res.* **89**, 9683.
- [22] Kane, S.R., Chupp, E.L., Forrest, D.J., Share, G.H., and Rieger, E.: 1986. Rapid acceleration of energetic particles in the 1982 February 8 solar flares, *Ap.J. (Lett)*. **300**, 95.
- [23] Karlický, M.: 1995. *Astron. Astrophys.* **298**, 913.
- [24] Kraus, J.D.: 1966. *Radio Astronomy*, McGraw-Hill.
- [25] Kundu, M.R.: 1980. *Radio Physics of the Sun*. 3-4.
- [26] Kundu, M.R., Woodgate, B., and Schmahl, E.J.: 1989. *Energetic Phenomena on the Sun*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [27] Lang, K.R., Willson, R.F., Smith, K.L., and Strong, K.T.: 1987. *Ap.J.* **322**, 1035.
- [28] Lara, S.A.: 1993. *Tes. M. en C., Fac. Ciencias, UNAM*.
- [29] Low, B.C.: 1990. *ARA A*, **28**, 491.
- [30] Mackinnon, A.L.: 1991. *Vistas Astron.* **34**, 331.
- [31] Mandrini, C.H., Bémoulin, P., Rovira, M.G., de la Beaujardiére, and
- [32] Hénoux, J.C.: 1995. *Astron. Astrophys.* **303**, 927.
- [33] McPherson, M.R., Lin, H., Kuhn, J.R.: 1992. *Solar Phys.* **139**, 255.
- [34] Melrose, D.B.: 1994. *Astrophys. J. Suppl.* **90**, 623.

- [35] Miller, J.A., and Roberts, D.A.: 1997. *Astrophys. J.* (in press).
- [36] Munro, R.H., and Sime D.G.: 1985. *Solar Phys.* **97**, 191.
- [37] Murphy, R.J., and Ramaty, R.: 1985. *Adv Space Res.* **4**, 127-136.
- [38] Nita, N., White, S.M., Kundu, M.R., Gopalswamy, N., Holman, G.D., J.W., Schmelz, J.T., Saba, J.L.R., and Strong K.T.: 1991. *Astrophys.J.* **374**.
- [39] Pettit, E.: 1943. *Astrophys.J.* **6**, 98.
- [40] Pérez, E.R.: 1987. Tes. Dr. Imperial College, U. de Londres. **52**, 212.
- [41] Poquerusse, M.: 1994. *Astron. Astrophys.* **286**, 611.
- [42] Priest, E.R., Hood, A.W., Anzer, V.A.: 1989. *Astrophys.J.*
- [43] Ramaty, R., Colgate, S.A., Dulk, G.A., y col.: 1980. *Solar Flares*, Sturrock, P.A. (ed)(Boulder Co Univ Press, Boulder, 1980).
- [44] Raulin, J.P., Kundu, M.R., Hudson, H.S., Nitta, N., and Raoult, A.: 1996. *Astron. Astrophys.* **306**, 299.
- [45] Reames, D.V.: 1999. *Space Science Revs.* **90**, 413.
- [46] Rohlfs K.: 1986. *Tools of Radio Astronomy*, Astronomy and Astrophysics Library.
- [47] Sawyer, C., Wagner, W.J., Hundhausen, A.J., House, L.L., and Illing, R.M.: 1984. *J. Geophys Res.* **5**, 2639.
- [48] Sheeley, N.R. Jr, Howard, R.A., Koomen, M.J., Michels, D.J., Schwenn, R., Mulhauser, K.H., and Rosenbauer, H.: 1985. *J. Geophys Res.* **90**, 163.
- [49] Sheeley, N.R.Jr., Howard, R.A., Michels, D.J., and Koomen, M.J.: 1980. *Solar Observations with a new Earth-orbiting coronagraph*. In *Solar and Interplanetary Dynamics*, eds. Dryer, M., and Tandberg-Hanssen, E. (Hingham, Mass.: Reidel, D.) . 55-59.
- [50] Smith, D.F., and Miller, J.A.: 1997. *Astrophys. J.* (in press).
- [51] Sturrock, P.A.: 1979. *Solar Flares*, Report of NASA Skylab Workshop on Solar Flares (Boulder: Colorado University Press).
- [52] Sturrock, P.A., y Coppi, B.: 1966. *Astrophys. J.* **143**, 3
- [53] Sturrock, P.A., et al. 1980, ed., *Proceedings of the Sky Lab Workshop on Solar Flares*, Boulder; Colorado Associated University Press, 1980.

- [54] Sunyaev, R., et al. 1991, in Proc 28 th Yamada Conf. On Fronties of X-ray Astronomy ed. Tanaka, Y. Koyamo, K. (Nagoya, Japan).
- [55] Suzuki, S., and Dulk, G.A.: 1985. In McLean, D.J., and Labrum, N.R. (eds), Solar Radiophysics, Cambridge University Press, Cambridge. 289.
- [56] Svestka, Z.: 1976. Solar Flares, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland.
- [57] Takakura, T.: 1967. Solar Phys. **1**, 304.
- [58] Tanaka, K., Nitta, N., and Watanabe, T.: 1982. The energetics of the elementary bursts. Hinotori Symposium on Solar Flares, Inst. of Space and Astronautical Sci., Tokyo, Japan. 20-26.
- [59] Tousey, R.: 1973. The solar corona. In Space Research XIII, eds. Rycroft, M.J., and Runcorn, S.K. (Berlin: Akademie-Verlag). 713-730.
- [60] Tsyтович, V.N.: 1966. Soviet Phys.-Uspekhi. **9**, 370.
- [61] Wagner, W.J.: 1983. SERF Studies of mass motions arising in flares. Adv. Space Res. **2**: 203-213.
- [62] Wagner, W.J.: 1984. Ann. Rev. Astron Astrophys. **22**, 267.
- [63] Webb, D.F.: 1992. IA4 Coll. 123. Lecture Notes in Physics. **234**, 399.
- [64] Webb, D.F., and Hundhausen.: 1987. Solar Phys. **108**, 383.
- [65] Webb, D.F., and Howard, R.A.: 1994. J. Geophys. **99**, 4201.
- [66] Wild, J.P., Smerd, S.F., and Weiss, A.A.: 1963. Ann Rev Astron Astrophys. **1**, 291-366.
- [67] Yoshimori, M. Okudaira, K., Hirasima, Y., and Kndo, I.: 1983. Solar Phys. **86**, 375.
- [68] Zharkova, V.V., and Brown, J.C.: 1994. Proc. of the Third SOHO Workshop. **61**.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN