

## LA RAFAGA SOLAR DEL DIA 9 DE FEBRERO DE 1958

Luis Rivera Terrazas y Graciela González C.

## SUMARIO

El día 9 de Febrero de 1958 se observó una ráfaga (flare) de clase 2 que mostró una serie de fenómenos interesantes entre los cuales se pueden mencionar la D. B. del filamento (filament) asociado al grupo de manchas (spot group) en cuya vecindad ocurrió la ráfaga, el corrimiento de la porción B de la ráfaga que dio como resultado el cubrimiento de la umbra (umbra) de la mancha vecina y la ocurrencia de una cuasi ráfaga (flare-like-faculae) paralela al filamento que sufrió la D. B. Además esta ráfaga produjo una fuerte tormenta de radio (solar radio burst), una gran tormenta geomagnética (geomagnetic storm), y una aurora boreal visible desde la ciudad de México.

1.—El día 9 de Febrero de 1958 fue observada en Tonantzintla, con el filtro Lyot (1), una ráfaga cromosférica de importancia 2 la cual ocurrió en una zona cercana al centro del disco solar ocupada por varios grupos de manchas. Estos grupos, tomados en conjunto, constituían una región de gran complejidad magnética.

El estudio de esta ráfaga es de particular interés pues en ella aparecen con gran claridad toda una serie de fenómenos que recientemente han sido observados individualmente en numerosas ráfagas. Podemos decir que la ráfaga mencionada presenta un cuadro, casi completo, de todos aquellos fenómenos que deben estar ligados, directa o indirectamente, con las ráfagas solares de mayor importancia.

Es interesante mencionar también que esta ráfaga fue el origen de una serie de perturbaciones geomagnéticas observadas varias horas más tarde. En primer lugar la ráfaga estuvo acompañada por una explosión de ondas de radio de tipo espectral IV (tanto en  $\lambda\text{cm.}$  como en  $\lambda\text{m}$ ) seguida varias horas más tarde por una absorción en la capa polar (P. C. A.) la cual ocurrió el día 10 de Febrero. La Tabla 1 contiene los datos relativos a la explosión de ondas de radio (2).

TABLA 1

| <i>Fecha</i> | <i>Tiempo*</i>  | <i>Int. Máx.</i> | <i>Intervalo de frecuencias. Mc/seg.</i> |
|--------------|---|------------------|--|
| Feb. 9       | 21 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> — 23 <sup>h</sup> 02 <sup>m</sup> | 3                | > 580 — < 100                            |

\* Todas las observaciones estarán expresadas en tiempo universal T. U.

En segundo lugar la ráfaga del 9 de Febrero produjo una gran tormenta geomagnética que se inició con un "comienzo repentino" (S. C.). Según datos de Mt. Wilson esta tormenta fue la más intensa registrada después de la que ocurrió el 24 de Marzo de 1940 con una  $\Delta H > 850 \gamma$ . Los datos sobre la tormenta magnética producida por la ráfaga del 9 de Febrero aparecen en la Tabla 2 (3).

TABLA 2

| <i>Principio</i>                         | <i>Fin</i>               | $\Delta H$   |
|--|--------------------------|--------------|
| Feb. 11; 01 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup> | Feb. 13; 01 <sup>h</sup> | 735 $\gamma$ |

Como es bien sabido las diferentes perturbaciones geomagnéticas son el resultado de la llegada a la tierra de una nube de partículas solares emitidas desde las regiones vecinas a la ráfaga. Las observaciones revelan que el 80, 30 y 20% de las ráfagas de clase 3+, 3 y 2 respectivamente, que ocurren en la región central del disco solar, están acompañadas por tormentas magnéticas y que el intervalo medio de tiempo transcurrido entre la iniciación de la ráfaga y la llegada de las partículas a la Tierra es de 22<sup>h</sup> para ráfagas de clase 3+ y de 34<sup>h</sup> para ráfagas de clase 3. El intervalo más corto registrado ha sido de 17<sup>h</sup> (4). El intervalo para la ráfaga en cuestión resultó ser de unas 28<sup>h</sup>, menor que el intervalo medio para ráfagas de clase 3, lo cual indica que se trata de partículas de alta velocidad.

Además, es un hecho ya bien establecido que la emisión de protones solares con energías comprendidas entre 10 y 300 MeV, responsables de la P. C. A., está casi invariablemente asociada con emisión de radio de tipo espectral IV. Esta ráfaga proporciona un ejemplo más de la validez de este principio.

Casi simultáneamente a la iniciación de la tormenta geomagnética se produjo una extraordinaria aurora boreal observada la noche del 10 al 11 de Febrero la cual se extendió a través de los terri-

torios de Alaska, Canadá y los EE. UU. La aurora fue de tipo A (aurora roja y alta) lo cual es característico de las épocas de máxima actividad de manchas solares. Un hecho digno de ser mencionado es que dicha aurora fue visible incluso desde la ciudad de México cuya latitud geográfica es de  $19^{\circ} 26'$ . Una descripción detallada de la aurora boreal observada en diferentes partes de los EE. UU. se encuentra en Sky and Telescope, Vol. XVII, pág. 280, Abril de 1958.

2.—La actividad de manchas solares fue muy alta durante los meses de Enero y Febrero de 1958, con valores medios para el número R de Wolf de 202.8 y 151.6 respectivamente. El día 26 de Diciembre de 1957 el número de Wolf fue  $R = 366$  siendo el más alto valor del último ciclo solar. El día 9 de Febrero de 1958 el número de grupos observados fue igual a 14 siendo  $R = 164$ .

La región central del disco solar estuvo ocupada por cuatro grupos de manchas cuyos datos se encuentran en la Tabla 3.

TABLA 3

| No. del Grupo<br>Mt. W. | Posición      |                            | Campo Magnético<br>$H \times 10^2$<br>gauss | Clasif. Mt. W. | Clasif. Zürich | Área en $10^{-6}$ hemisferio* |
|-------------------------|---------------|----------------------------|---|----------------|----------------|-------------------------------|
|                         | Latitud       | Dist. al Meridiano Central |   |                |                |                               |
| 13000                   | $-14^{\circ}$ | 17W                        | 37  | $1\alpha pl$   | H15            | 896                           |
| 13004                   | $-18$         | 2W                         | 18  | $1\beta 1$     | E55            | 1575                          |
| 13011                   | $-8$          | 15W                        | 4   | $d\beta d$     | A4             | 73                            |
| 13015                   | $-15$         | 9E                         | 4   | $\alpha pl$    | B4             | 146                           |

\*  $10^{-6}$  hemisferio solar =  $3.04 \times 10^6$  km<sup>2</sup>.

Esta región se caracterizó, el día 9 de Febrero, por una gran actividad de ráfagas solares entre las cuales se destacaron dos de importancia 2- y 2. Además, en la misma región ocurrieron dos ráfagas de clase 1+ y cuatro de clase 1-. De las 24 ráfagas solares registradas ese día las más importantes ocurrieron en la región central. Fuera de esta región solo se observaron dos ráfagas de clase 1+. La tabla 4 es un resumen de la actividad de ráfagas de dicha región central (5).

TABLA 4

| No. | Dist. al Meridiano Central | Lat. | Tiempo                          |                                 | Máx.                            | Clase | Área grados <sup>2</sup> |
|-----|----------------------------|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------------------------|
|     |                            |      | Principio                       | Fin                             |                                 |       |                          |
| 1   | 5E                         | 20S  | 02 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> | 03 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> | 02 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup> | 2-    | 5.6                      |
| 2   | 8E                         | 20S  | 05 13                           | 05 20                           |                                 | 1-    | 1.8                      |
| 3   | 1E                         | 22S  | 05 51                           | 06 14                           | 05 60                           | 1+    | 5.3                      |
| 4   | 14W                        | 17S  | 09 05                           | 09 10                           | 09 06                           | 1-    |                          |
| 5   | 1W                         | 20S  | 13 30                           | 14 53                           | 13 41                           | 1+    | 6.7                      |
| 6   | 8E                         | 14S  | 15 15                           | 15 50                           | 15 37                           | 1-    | 0.6                      |
| 7*  | 15W                        | 11S  | 21 08                           | 23 02                           | 21 41                           | 2     | 13.5                     |
| 8   | 5E                         | 16S  | 21 18                           | 21 24                           | 21 20                           | 1-    | 0.7                      |

\* De acuerdo con nuestros filtrogramas esta ráfaga se inició a las 21<sup>h</sup>05<sup>m</sup> y continuaba brillando aún a las 23<sup>h</sup>45<sup>m</sup> tiempo en que se suspendió la observación del día.

Es interesante hacer notar que este conjunto de grupos de manchas se distinguió por una gran actividad de ráfagas durante todo el tiempo en que fue visible (Febrero 2 a Febrero 15) compartida solamente por el grupo No. 12997 quien mostró también una gran actividad durante el mismo periodo.

Los grupos de manchas considerados estuvieron asociados a un filamento de tipo AS, de acuerdo con la clasificación de Menzel Evans, el cual estaba formado por dos porciones morfológicamente diferentes:

a.—Una porción curva muy delgada, de densidad uniforme, que separaba los grupos 13004, 13015 de los grupos 13000 y 13011. Fue a lo largo de esta porción donde se desarrolló la ráfaga que estamos

considerando (Ráfaga No. 7 de la Tabla 4). La estabilidad de la porción "a" del filamento fue muy grande pues salvo ligeras perturbaciones durante el desarrollo de la ráfaga No. 7 mantuvo su estructura sin ningún cambio apreciable.

b.—Esta porción, menos densa y homogénea, se hallaba completamente fuera de la región del campo magnético de los centros de actividad considerados, orientada en la dirección norte apuntando su extremo sur hacia la mancha p del grupo 13004 lo cual es característico de este tipo de filamentos. Esta porción fue la más afectada por la actividad de ráfagas de ese día.

3.—La ráfaga No. 7 se inició simultáneamente a ambos lados del filamento "a". Por comodidad en la descripción del fenómeno llamaremos porción A a la ráfaga que se desarrolló del lado convexo del filamento "a", y porción B a la que ocurrió del lado cóncavo.

La porción A se inició cerca del punto de unión de los filamentos "a" y "b" y sobre una fábula delgada que corría paralela al filamento. Desde el principio mismo la ráfaga A se desarrolló en dos direcciones: i.—a lo largo de la fábula mencionada, entre las 21<sup>h</sup> 05<sup>m</sup> y las 21<sup>h</sup> 24<sup>m</sup>, formando un filamento brillante y delgado. La expansión longitudinal de la ráfaga ocurrió de un modo continuo. ii.—hacia el norte, en dirección sensiblemente paralela al filamento "b" y a partir del punto de iniciación de la porción A, alcanzando su máxima extensión a las 21<sup>h</sup> 19<sup>m</sup>. Originalmente esta prolongación estaba formada por varios puntos brillantes, separados, que más tarde se unieron formando un delgado y bien definido filamento.

A las 21<sup>h</sup> 24<sup>m</sup> se observó claramente la expansión lateral de las partes i y ii que más tarde se confundieron formando una especie de cuña. Es decir la fase explosiva de esta ráfaga (6) se inicia en ese momento expandiéndose el borde más alejado respecto al filamento. El borde cercano al filamento no sufrió ninguna modificación. Si tomamos en cuenta que los filamentos asociados a grupos complejos de manchas tienen su asiento en regiones magnéticamente neutras entonces la expansión observada en la ráfaga 7 debe ocurrir sobre regiones donde exista un campo magnético débil. De esta manera puede interpretarse la dirección preferencial de la expansión de las ráfagas observadas por Athay y Moreton (op. cit).

La porción B de la ráfaga se originó en el borde W de la umbra de la mancha p del grupo 13004. Durante la primera fase la ráfaga B se desarrolló siguiendo el contorno de la umbra y aumentando en brillo. Posteriormente se desenvolvió siguiendo una dirección casi paralela a la del filamento "a". A las 21<sup>h</sup> 18<sup>m</sup> se inicia su expansión lateral hasta cubrir, completamente, la umbra de la mancha mencionada. Simultáneamente a esta expansión se inició la fuerte emisión de radio  $\lambda$ cm confirmándose las conclusiones de M. J. Martres —Trope y de M. Pick— Gutmann en el sentido de que la intensidad de la explosión en  $\lambda$ cm. es mayor entre mayor es la parte de la mancha cubierta por la ráfaga. Como en el caso anterior la expansión ocurre solamente del lado opuesto al filamento "a".

4.—Entre los fenómenos más sobresalientes, observados ópticamente en nuestros filtrogramas, que ocurrieron como consecuencia de la ráfaga No. 7 podemos mencionar los siguientes:

I.—La gran actividad de ráfagas en la región central del disco solar se manifestó, mucho antes de la ocurrencia de la ráfaga No. 7, en las grandes perturbaciones que sufrió el filamento "b". Desde las 16<sup>h</sup> 00<sup>m</sup>, tiempo en que se inició la observación del día, el filamento mostró importantes cambios estructurales sin llegar a su desaparición. Por ejemplo, a las 17<sup>h</sup> 26<sup>m</sup> su extremo norte se encontraba fuertemente perturbado, mientras que a las 18<sup>h</sup> 16<sup>m</sup> aparecieron corrientes gaseosas que partían del mismo extremo. De la observación de los movimientos en gran escala que ocurrieron casi de un modo continuo en el filamento puede concluirse que cualquiera que sea el mecanismo causante de tales perturbaciones (ondas de choque, ondas hidromagnéticas) este tiene una gran persistencia que se manifiesta por un lento amortiguamiento cuyos efectos se dejan sentir durante un tiempo relativamente largo. Además el hecho de que la recuperación de un filamento que ha sufrido una D. B. sea del orden de varias horas fortalece esta suposición.

Como consecuencia de la ráfaga No. 7 se inicia, casi simultáneamente con el principio de la ráfaga, la D. B. del filamento "b". Este recupera horas más tarde su forma y posición originales como lo revelan los primeros filtrogramas del día 10 de Febrero. La secuela de perturbaciones que condujeron a la D. B. del filamento fue la siguiente: a las 21<sup>h</sup> 01<sup>m</sup> se inicia un rompimiento del filamento aproximadamente a la mitad del mismo que lo divide en dos partes que permanecen ligadas tangencialmente entre sí. Once minutos más tarde la separación es perfectamente visible iniciándose la disolución de la parte norte del filamento. La disolución se manifestó en forma de una aparente contracción transversal del filamento.

A las 21<sup>h</sup> 17<sup>m</sup> aparece en la región de la rotura una nebulosidad brillante y difusa que se extiende rápidamente alcanzando su máxima extensión y brillo a las 21<sup>h</sup> 22<sup>m</sup> para desaparecer a las 21<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>. Durante la expansión de la nube brillante se produce la desaparición casi total de la parte norte del filamento. La porción sur resulta también afectada aunque en menor grado y más tardíamente pues esta no desaparece totalmente advirtiéndose rastros de ella en la última fotografía del día.

II.—A las 21<sup>h</sup> 18<sup>m</sup> la parte norte del filamento se redujo a una pequeña porción de la cual a las

21<sup>h</sup> 36<sup>m</sup> surge una corriente gaseosa oscura en forma de arco que se extiende hasta alcanzar el extremo sur de la fácula del grupo A5 (No. 13014 de Mt. Wilson). La iniciación de esta corriente gaseosa coincide con el incremento en brillo de esta porción de la fácula la cual vuelve a su normalidad alrededor de las 22<sup>h</sup> 46<sup>m</sup>. A las 21<sup>h</sup> 54<sup>m</sup> se inicia, desde la misma región, una segunda corriente gaseosa en arco que se disuelve a las 22<sup>h</sup> 36<sup>m</sup>.

Obviamente tanto por su brillo como por su estructura dichas corrientes gaseosas no pueden ser confundidas con los brotes clásicos ("surges") que ocurren casi siempre en la cercanía de los centros de actividad.

III.—A las 22<sup>h</sup> 01<sup>m</sup>, o sea unos 45 minutos después de iniciarse la desaparición del filamento empieza el desarrollo de una cuasi-ráfaga típica ("flare-like faculae") que se extiende al oeste y paralelamente al filamento separada solo unos cuantos grados de este. Esta cuasi ráfaga aparece como una prolongación del vértice norte de la ráfaga A.

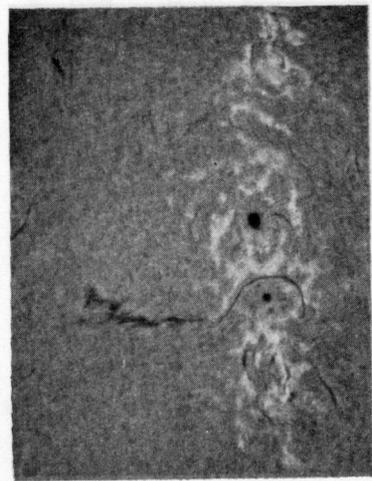
IV.—Es un hecho conocido (7) que durante el desarrollo de grandes ráfagas solares que presentan filamentos dobles paralelos ocurren desplazamientos laterales de estos filamentos con velocidades hasta de 10 km/seg. que tienden a separarlos. Según Z. Svestka aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de las ráfagas de clase 2 o mayor muestran este efecto. En el caso de la ráfaga del 9 de Febrero el fenómeno se mostró con toda claridad sobre todo en la porción B, la cual, como se dijo ocurrió sobre la umbra de la mancha p del grupo No. 13004. Aproximadamente a las 22<sup>h</sup> 18<sup>m</sup> se inicia el desplazamiento de la porción B hacia el este dando como resultado el descubrimiento de la mancha p del grupo mencionado y su alejamiento del filamento "a". El movimiento de la ráfaga B es frenado sin que esta logre cubrir la umbra de la mancha vecina. La ráfaga B se disuelve posteriormente entre estas dos manchas. La porción A no comparte el desplazamiento.

Parece plausible afirmar, por lo tanto, que el frenamiento de la masa gaseosa de la ráfaga B es de origen electromagnético. Supongamos una masa gaseosa con una densidad  $n_p = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  o sea  $10^3$  a  $10^5$  veces la densidad de la cromósfera superior y de la baja corona respectivamente, siendo  $\rho \sim 10^{-11} \text{ gm cm}^{-3}$ , con una longitud  $l = 10^3 \text{ km}$  y moviéndose con una velocidad de  $10 \text{ km seg}^{-1}$ . La presión magnética por  $\text{cm}^2$  es  $H^2/8\pi$  y supongamos que dicha masa gaseosa es frenada en un tiempo del orden de 10 minutos. Entonces,  $H^2 = 8\pi\rho l v/t$ . Luego para  $\rho = 10^{-11} \text{ gm cm}^{-3}$ ,  $l = 10^3 \text{ km}$ ,  $v = 10^6 \text{ cm seg}^{-1}$  y  $t = 6 \times 10^2 \text{ seg}$  tenemos  $H = 6 \text{ gauss}$  que es un valor muy razonable para el campo magnético en la cromósfera. L. Marshall (8) encuentra que la intensidad del campo magnético de un dipolo a una altura R sobre un par de manchas solares, separadas por una distancia l y con un diámetro igual a d, es  $H = H_0 l d^2 / 4\pi R^3 \text{ gauss}$ . Si suponemos que  $H_0 = 2 \times 10^3 \text{ gauss}$ ,  $l = 3 \times 10^4 \text{ km}$ ,  $d = 3 \times 10^3 \text{ km}$ , entonces la intensidad del campo a la altura  $R = 2 \times 10^4 \text{ km}$ , que es la altura a la que se supone ocurren las ráfagas, es aproximadamente igual a 5 gauss, resultado que coincide con el previamente obtenido. Luego en ausencia de otras fuerzas predominantes la presión magnética actúa frenando el movimiento de las masas gaseosas que constituyen las ráfagas.

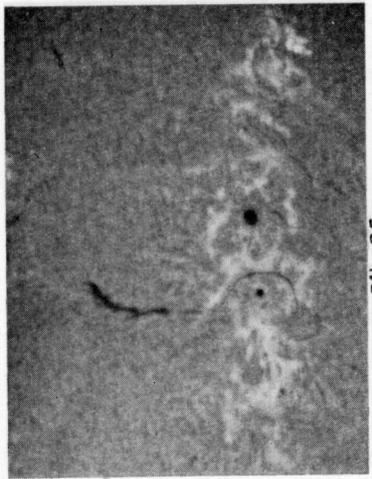
5.—Los diversos fenómenos que dieron origen a la desaparición del filamento apoyan fuertemente la idea de que dicha desaparición tiene un origen electromagnético y no óptico como por ejemplo una súbita reducción en la opacidad de  $H\alpha$  debida principalmente a la despoblación del segundo nivel cuántico del hidrógeno. Entre los hechos más destacados que hacen sospechar el origen electromagnético de este fenómeno podemos mencionar los siguientes:

- a) Las corrientes gaseosas observadas durante el proceso de disolución del filamento cuyo origen es claramente magnético como lo revela la trayectoria seguida por las mismas;
- b) La aparición de la cuasi ráfaga es un hecho de los más elocuentes. Según Bruzek (ver ref. 4) la aparición de las motas brillantes alineadas paralelamente al filamento son una prueba de que tanto las fáculas como las ráfagas son calentadas por corrientes eléctricas inducidas en la cromósfera por campos magnéticos variables.
- c) Es un hecho actualmente bien establecido que tanto las formas como el movimiento de las prominencias están controladas por el campo magnético de las mismas. Según H. Zirin (10) en las prominencias activas se encuentran campos magnéticos hasta de 150 gauss mientras que en las quiescentes los campos son del orden de 50 gauss. Esto significa que cualquier alteración en la estructura del filamento debe estar precedida por una radical modificación de su campo magnético.

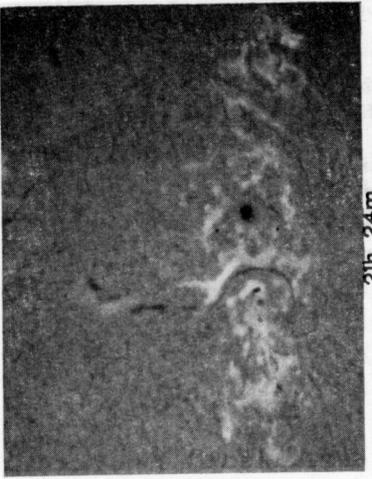
La acción del bombardeo de partículas emitidas desde la zona de la descarga que da origen a la ráfaga, se manifiesta por la iluminación de algunas partes del filamento de manera análoga a la producción de las auroras en la atmósfera terrestre por los protones que llegan a ella. Esto sugiere que la descarga ocurre arriba de la cromósfera.



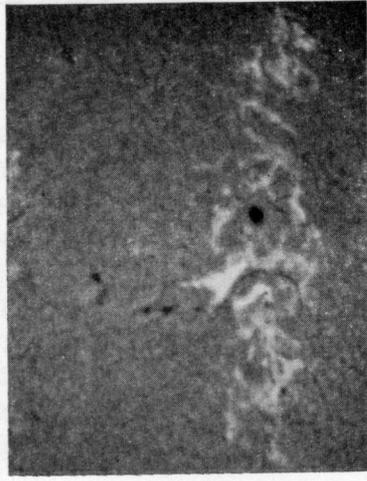
16h 34m



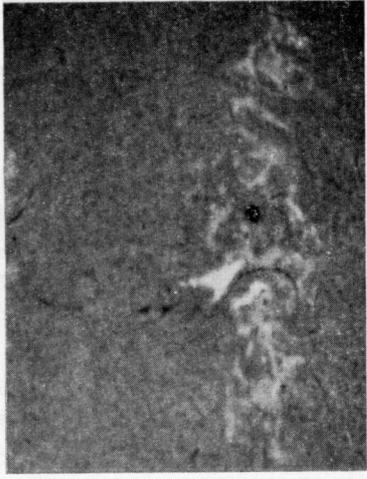
21h 05m



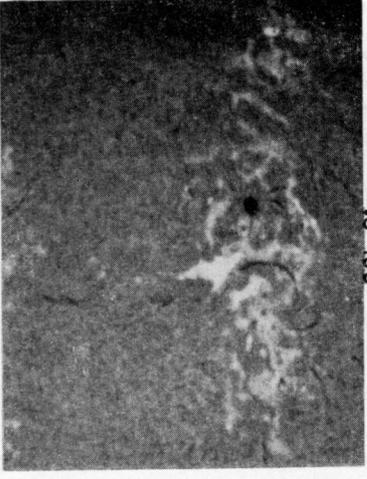
21h 24m



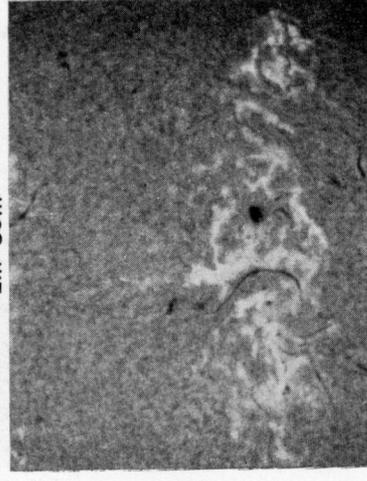
21h 36m



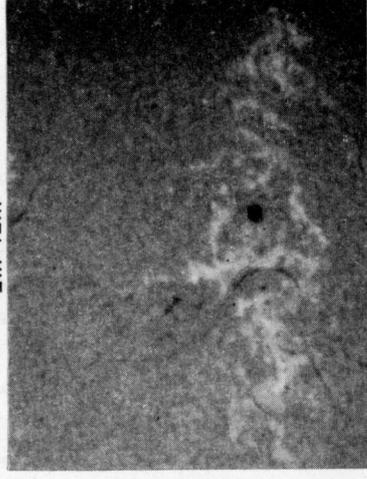
21h 42m



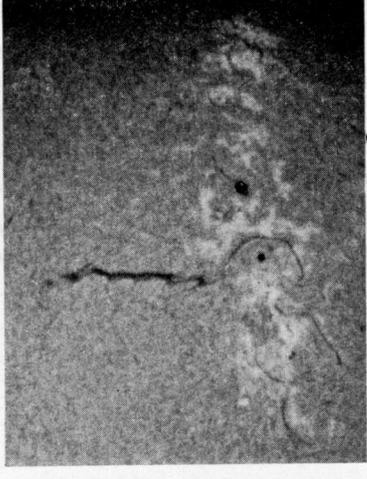
22h 01m



22h 46m



23h 21m



Febrero 10 16h 16m

#### BIBLIOGRAFIA

1. Para la descripción del filtro Lyot del Observatorio de Tonantzintla ver el *Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya* No. 20, Mayo de 1960.
2. A. Maxwell, M. P. Hughes, A. R. Thompson; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 68, No. 5, March 1, 1963.
3. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Vol. 70, 319, 1958.
4. C. de Jager; *Handbuch der Physik*. Vol. 52, Heidelberg (Springer), 1959.
5. *I. G. Y. Solar Activity Reports Series*, No. 17, Mayo 1, 1962, High Altitude Observatory.
6. R. Grant Athay y Gail E. Moreton; *Ap. J.* 133, 935, 1961.
7. H. W. Dodson; *Ap. J.* 110, 382, 1949. B. Valnicek; *Bull. Astr. Inst. Czechoslovakia* 12, 237, 1961. Z. Svestka; idem 13, 190, 1962. J. M. Malville y G. E. Moreton; *P. A. S. P.* 75, 176, 1963.
8. L. Marshall; *Ap. J.* 126, 177, 1957.
9. H. Zirin; *Transact. Internac. Astronom. Union*, XIB, 439, 1961.