

1980, ANY DE MÀXIMA

per Teodor Roca i Costes i Lluís Tomàs i Roig


34 (634/octubre 1981

ciència 10)

Donat que el 1980 era un any de màxima activitat solar, el Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP) organitzà una observació intensiva del Sol durant tot l'any; la campanya ha estat anomenada Solar Maximum Year (SMY) i encara dura actualment. Seixanta-tres observatoris de vint-i-dos països asseguren l'observació ininterrompuda en la zona de ràdio, de l'infraroig i del visible durant les vint-i-quatre hores del dia. L'observació en longituds d'ona més curtes es porta a terme mitjançant un satèl·lit, especialment llançat per a aquesta missió, anomenat "Solar Maximum Mission" (SMM).

Teodor Roca i Cortés (la Fuliola, Lleida, 1951) és llicenciat en física per la Universitat de Barcelona, doctorat a la Universitat de La Laguna i professor d'aquesta institució. Actualment treballa juntament amb científics de la Universitat de Birmingham en el camp de l'espectroscopia solar d'alta resolució.

Lluís Tomàs i Roig (Barcelona, 1942) és directiu de l'Agrupació Astronòmica de Sabadell i ha estat premiat per la Société Astronomique de France el 1975 per les seves observacions planetàries. Es dedica des de fa anys a l'observació solar a l'IAC.

 Una estrella mitjana entre els mil milions d'estels que formen la nostra galàxia, el Sol, és el resultat de la condensació d'un núvol de gas interestel·lar sota la seva pròpia força gravitatòria. La massa del Sol és prou gran perquè aquesta força augmenti la pressió i la temperatura centrals fins al punt que comencin les reaccions nuclears que el mantenen com una estrella. El Sol té un diàmetre de 1.400.000 km i és a 150 milions de km de la Terra (per tant, subtendeix un angle de $0,5^\circ$ aproximadament). La seva massa de 2×10^{27} tones, que constitueix el 99 per cent de la massa de tot el sistema solar, manté en òrbita al seu voltant els planetes, els asteroides i els cometes.

La geologia, la paleontologia i la biologia ens ensenyen que el Sol irradia la seva calor i la seva llum sobre la Terra amb la mateixa intensitat que fa dos mil milions

d'anys. Si el Sol original hagués estat format per un combustible sòlid tal com el carbó, la seva vida no hauria durat més de 30.000 anys. Avui, però, se sap com es produeix l'energia que el manté pràcticament inalterable durant tant de temps; cada segon el Sol transforma 500 milions de tones d'hidrogen en 496 milions de tones d'heli. Els quatre milions de tones de diferència són la massa que es transforma en energia, d'acord amb l'equació d'Einstein $E = mc^2$. Aquesta energia que el Sol produeix en un segon, podria satisfer les necessitats de la humanitat de l'any 2000 durant més de 500 milions d'anys. Aquesta pèrdua de massa per segon no és ni la mil·lèsima part de la massa que ha perdut des del seu naixement, fa cinc mil milions d'anys. Podem, doncs, assegurar que el Sol continuarà brillant com ara durant els pròxims deu milions d'anys.

ESTRUCTURA DEL SOL

El model d'estructura solar actualment admès consisteix en un *nucli central*, on la temperatura és de l'ordre de 15 milions de graus i la densitat de 100 g/cm^3 i que és on es desencadenen les reaccions de fusió de l'hidrogen. L'energia generada en el nucli es va transmetent cap a l'exterior, primer per radiació (*zona radiativa*) i més endavant per convecció (*zona convec-*

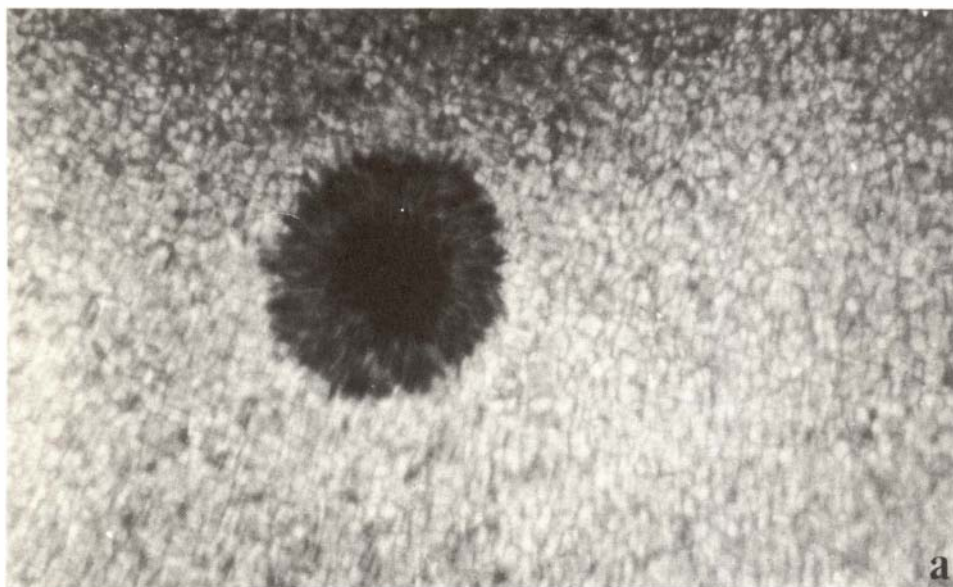
tiva), fins a arribar a la fotosfera, superfície visible del Sol amb una temperatura d'uns 6.000 °K, una densitat de 10^{-7} g/cm^3 i un gruix aproximat de 750 km. Per sobre de la fotosfera trobem la cromosfera, en certa manera l'atmosfera del Sol, que té uns 15.000 km de gruix i que només és parcialment visible durant un eclipsi total o amb l'ajuda d'un espectroheliògraf. La temperatura de la cromosfera no és gens uniforme; s'hi troba una barreja de temperatures entre els 5.000 i els 20.000 °K mentre que la densitat és 10^{-14} g/cm^3 aproximadament. La part més externa de l'atmosfera solar, la *corona*, només observable també durant un eclipsi total o amb un coronògraf, és formada per ions i electrons a una densitat baixíssima, 10^{-18} g/cm^3 , i a una temperatura molt alta, de l'ordre del milió de graus. La corona és una font important de raigs X i ultraviolats, i la seva forma varia amb l'activitat solar. No té uns límits precisos, però es va estenent per l'espai en forma de *vent solar* que injecta en el medi interplanetari partícules a velocitats de l'ordre de 400 km/s i pertorbacions electromagnètiques.

Del Sol rebem, doncs, informació en tot l'espectre electromagnètic, si bé només de les capes més exteriors; de fet, només els fotons que surten de la base de la fotosfera, i els més exteriors, arriben a la Terra sense haver interaccionat amb altres partícules i àtoms. El camp magnètic del Sol és molt baix, té una mitjana més petita que un Gauss.

ACTIVITAT SOLAR

Figura 1

- a) Taca solar observada amb llum blanca, voltada per la fotosfera en calma (granulació)
b) La mateixa zona del sol observada amb llum H, on es manifesta l'estructura de la cromosfera



L'ACTIVITAT SOLAR DE LA FOTOSFERA

Les *taques* són la pertorbació de la fotosfera solar que es coneix des de fa més anys, fins d'abans d'inventar-se el telescopi, cap a l'any 1610. Són la seu de fortíssims camps magnètics que poden ser d'uns centenars de Gauss en les ta-

ques petites, i d'uns milers en les grosses. En èpoques de gran activitat i si hi ha taques grosses, es poden veure a ull nu quan el Sol és a prop de l'horitzó, a causa del major gruix de l'atmosfera terrestre que actua com a filtre.

Una taca normal es compon de l'ombra, ben negra, voltada per la penombra (fig. 1). No és que l'ombra sigui negra; la diferència de temperatura entre l'ombra i

la fotosfera que l'envolta, uns 1.000 °K, és el que produeix aquest efecte. La grandària de les taques varia entre els 2.000 i els 100.000 km i poden durar entre uns quants dies i alguns mesos.

En una *regió activa*, un grup de taques, generalment dues, es disposen paral·lelament a l'equador solar. D'aquestes dues taques, la que és al davant, en el sentit de la rotació del Sol, s'anomena "precedent" i acostuma a ser més grossa que la del darrera o "següent". Sovint són seguides per un estol de taques més petites de curta durada. Fa molt de temps que se sap que la freqüència en l'aparició de taques sobre el disc del Sol segueix un cicle d'aproximadament onze anys. Durant aquest període, el Sol passa des d'un estat de relativa calma i poques taques (Sol tranquil) cap a una altra de gran activitat, com la de l'any 1980, ple de zones actives (Sol actiu). Al començament d'un cicle les taques apareixen en latituds solars d'uns 30° o 40° cap al sud i el nord de l'equador, però a mesura que el cicle avança, les taques surten cada cop més a prop de l'equador, fins a arribar a uns 10 °C. És poc freqüent trobar taques més enllà d'aquests límits.

La majoria dels grups de taques són bipolars, és a dir, si la taca precedent, per exemple, té polaritat positiva, la següent la té negativa, i mentre això passa en un grup de l'hemisferi nord, en els grups de l'hemisferi sud la polaritat és a la inversa, i aquest fenomen es manté durant tot el cicle d'onze anys (fig. 2). Però s'observa que en el cicle següent aquestes polaritats s'intercanvien i, per tant, podem dir que el cicle magnètic complet no és d'onze, sinó de vint-i-dos anys. Qui primer s'adonà d'aquest fenomen fou l'astrònom americà G.E. Hale, a principi de segle, i ens mostrà, que els fenòmens que succeeixen en el Sol no són esdeveniments aïllats, malgrat el seu enorme volum, sinó que formen part d'una immensa activitat conjunta i solidària, anomenada activitat solar, en què les taques són només una de les manifestacions exteriors.

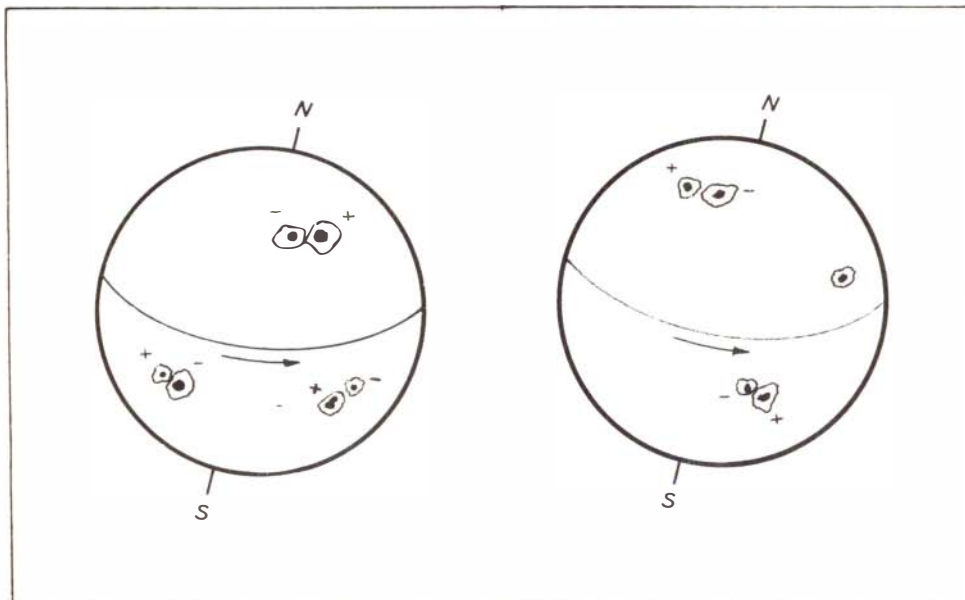
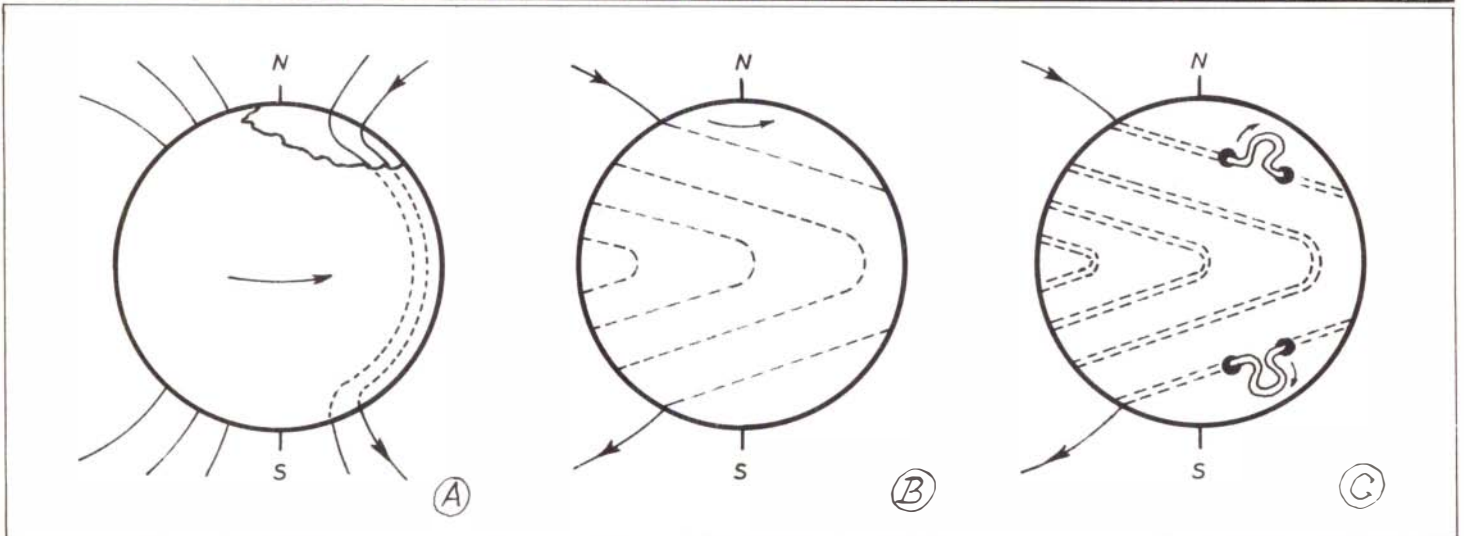


Figura 2
Canvi de polaritat magnètica en grups bipolars, en dos cicles consecutius d'onze anys

Figura 3
Proces que podria explicar l'activitat solar. Les línies de força del debilitat camp magnètic inicial, (a), arrossegades per la rotació diferencial, (b), formen uns tubs de flux que el van amplificant, fins que emergeixen a la fotosfera

Figura 4
Desenvolupament cronològic d'una flare, el 13 d'agost de 1980
1.- 12h 45m 43s
2.- 12h 53m 12s
3.- 13h 03m 30s
4.- 13h 16m 49s
5.- 14h 04m 55s
6.- 15h 23m 25s



ROTACIÓ DIFERENCIAL I ACTIVITAT SOLAR

El Sol no gira com ho fa un sòlid rígid. La velocitat angular a la superfície del Sol varia també amb la latitud heliogràfica. Des de la Terra, que gira al voltant del Sol amb el mateix sentit, podem veure com un punt o una taca prop de l'equador triga 27 dies a donar una volta completa, mentre que en un punt situat a 60° triga 32 dies. Aquest fenomen s'anomena *rotació diferencial* i sembla que està limitat a una capa relativament estreta i superficial del Sol; les zones més internes, encara que gasoses, deuen ser suficientment rígides per a girar com un bloc. Això vol dir que les capes més externes rellisquen sobre les més internes, i sembla que és així com es produeixen les variacions cícliques de l'activitat solar.

La teoria dinamo intenta explicar els cicles d'activitat solar a partir de la rotació diferencial. El model proposat per Babcock el 1961, i millorat més tard per altres autors, és el més acceptat actualment i suposa una situació inicial en la qual regna un camp magnètic dèbil, les línies de força del qual surten i es tanquen en les zones polars tot seguint les línies dels

meridians del Sol per sota de la fotosfera, a 0,1 radis solars (fig. 3a). Per efecte de la rotació diferencial, les zones que giren més ràpidament arrossegueu les línies de força del camp magnètic en el sentit de rotació del Sol, de manera que es van formant uns tubs de força que amplifiquen en gran manera el camp magnètic inicial (fig. 3b). Si la pressió magnètica és prou gran, els tubs de força emergeixen a la superfície en forma de nansa o rínxol, que es manifesten en la fotosfera com un grup de dues taques de polaritat contrària (fig. 3c). Com es pot veure, la polaritat

dels grups en els dos hemisferis és contrària, ja que les línies de força inicials van en direcció oposada. L'afloració dels tubs de força comença a latituds de $\pm 40^\circ$ i a mesura que es debilita el camp va baixant cap a l'equador.

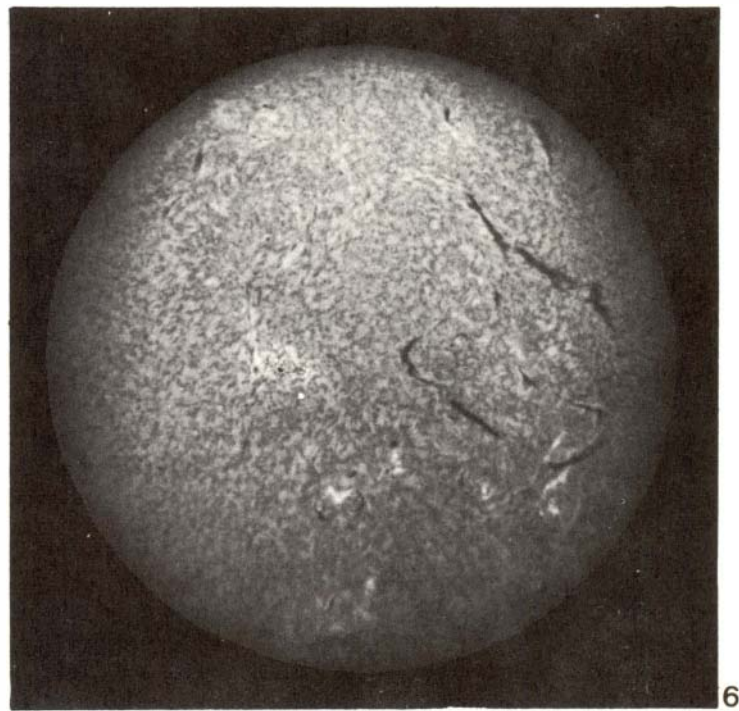
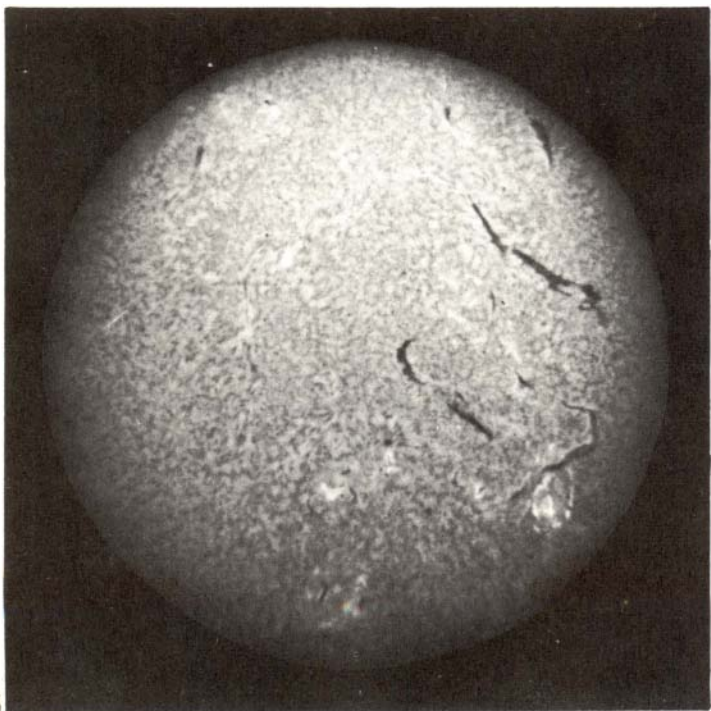
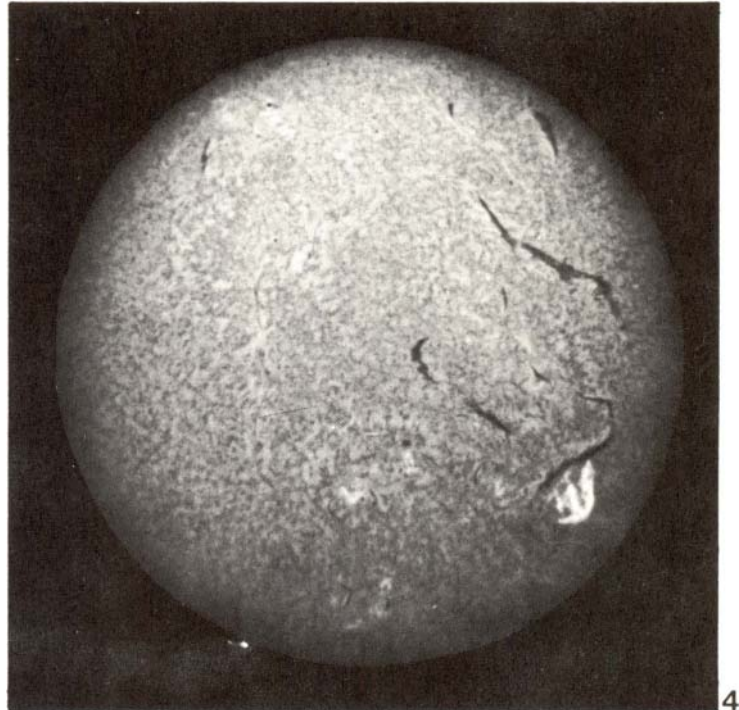
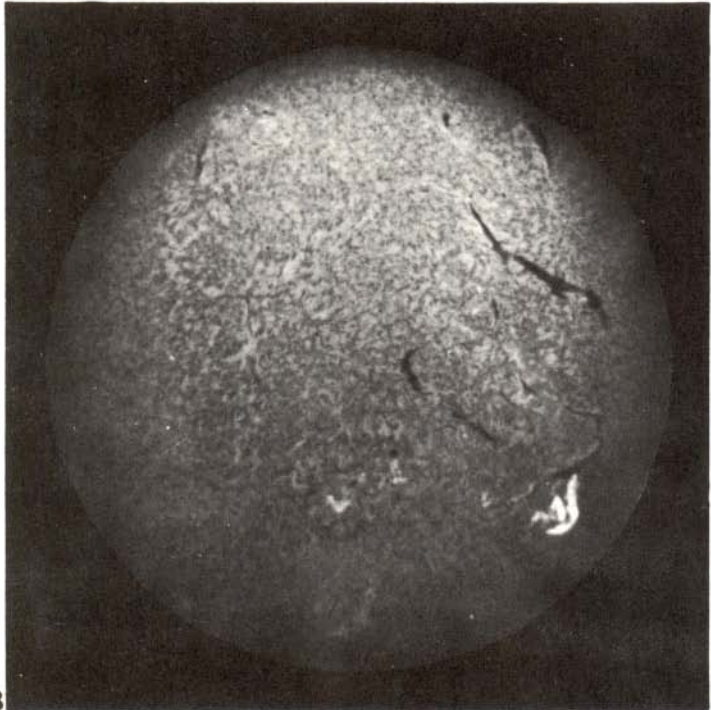
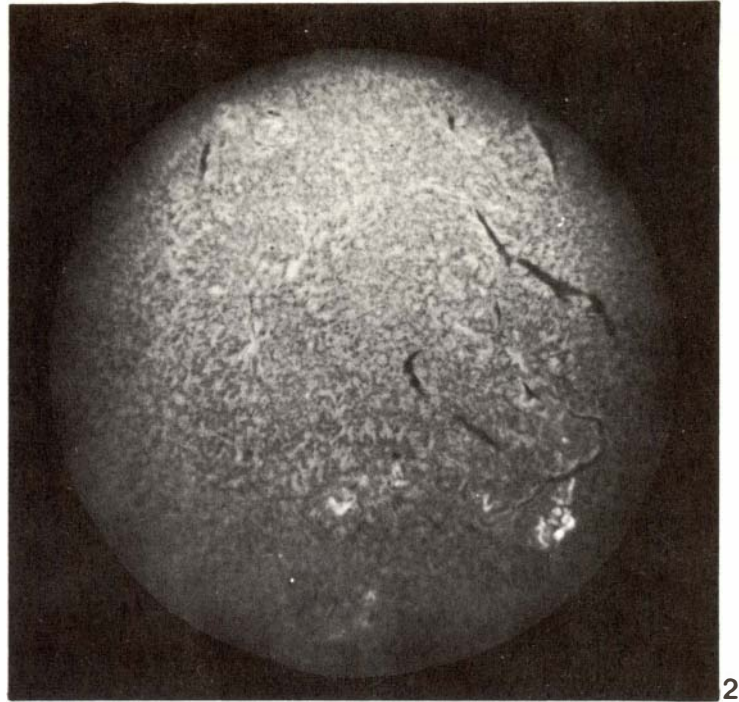
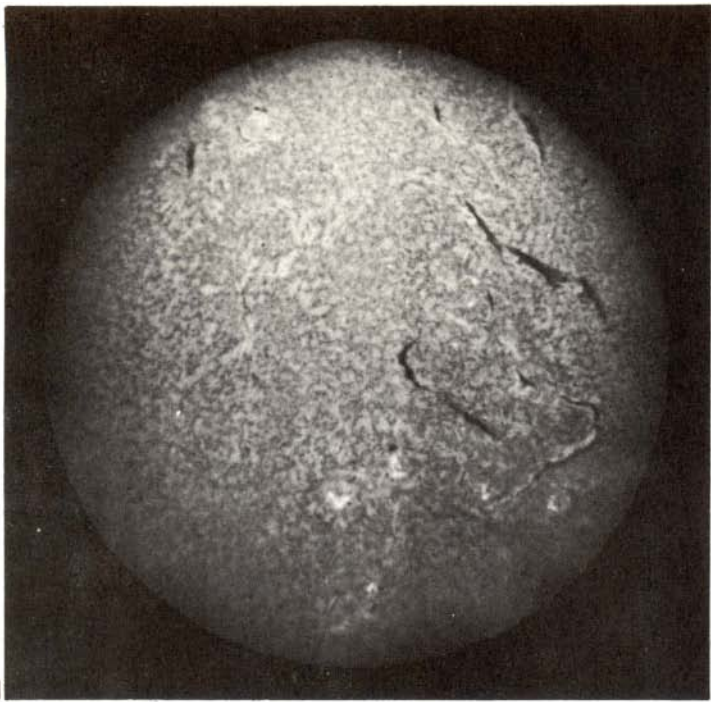
Les nanses magnètiques es van expandint per nivells baixos de la corona, i si s'acosten prou a d'altres rínxols, s'arriben a neutralitzar. Si un d'aquests contactes i posterior neutralització ocorre on hi ha camps magnètics molt intensos, pot esdevenir una *flare*. Tot aquest procés té una durada d'uns onze anys.

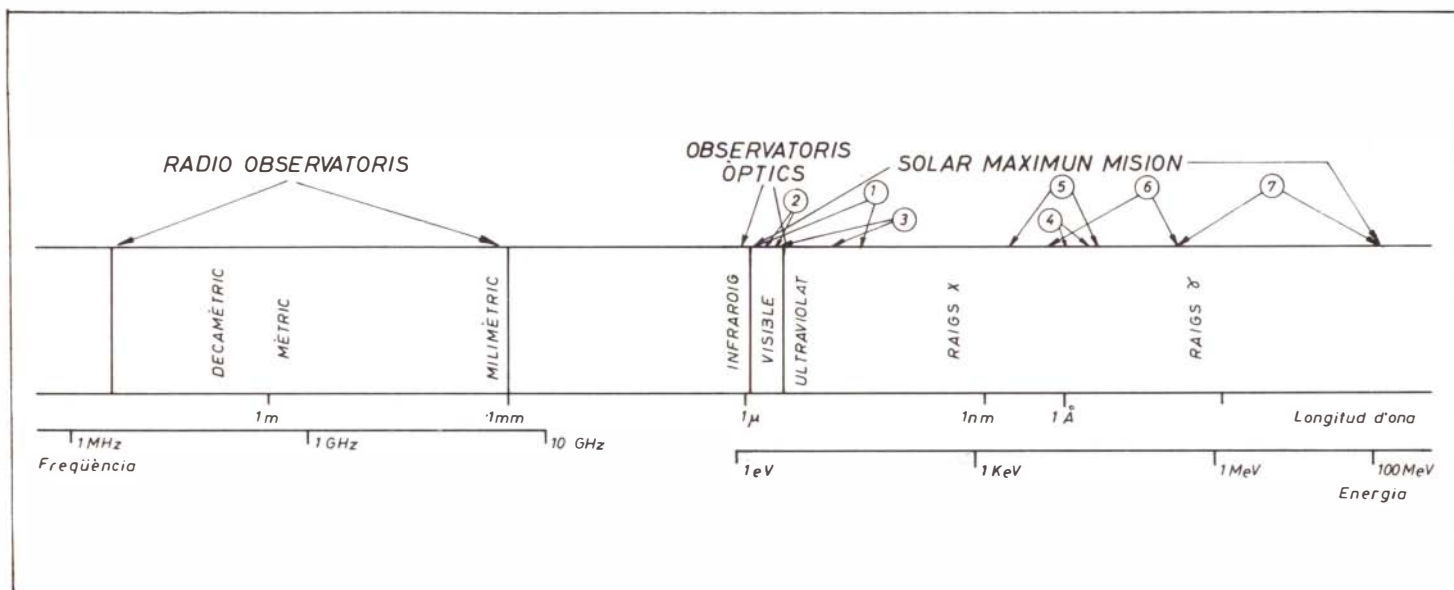
L'ACTIVITAT SOLAR A LA CROMOSFERA

Les *flares* són un dels fenòmens més importants que s'esdevenen en el Sol. Aquest mot anglès podria traduir-se al català com flamarada, fulguració, erupció, etc., però en tota la literatura sobre aquesta qüestió s'acostuma a emprar el mot *flare*, que és el que utilitzarem d'ara endavant. Podem definir una *flare* com un increment sobtat de brillantor d'una zona de l'atmosfera del Sol (cromosfera), generalment situada sobre una zona activa de la superfície (fotosfera), a causa d'un alliberament d'energia. S'arriba al màxim d'intensitat en molt poc temps i de seguida comença una lenta davallada que pot durar entre deu minuts i algunes

hores; es tracta, doncs, d'un fenomen extremament ràpid (fig. 4).

Altres fenòmens, com poden ser les tempestes magnètiques i les aurores, tenen lloc uns dies després. Les partícules d'alta energia emeses per una *flare* poden ser un inconvenient greu per als astronautes en vol al voltant de la Terra i fins per als passatgers d'avions supersònics, com el Concorde, que viatgen a alçades entre 15.000 i 20.000 metres. Per aquest motiu, quan hi ha vols espacials es posen en marxa programes coordinats d'observació per tal d'avisar amb temps sobre l'activitat solar.





EL PROGRAMA "SOLAR MAXIMUM YEAR"

Les *flares*, tot i ser el fenomen més important de l'activitat solar, són difícils de predir, i per tant difícils d'observar. Les observacions fetes fins ara són incompletes per diverses raons, com poden ser la manca d'instrumental adequat o la manca de personal suficient. Sovint, en un observatori, quan es disposa de tot el necessari, els núvols malmeten l'observació. La complexitat d'aquest fenomen, que té ressò en tot l'espectre electromagnètic, fa que s'hagin de fer mesures per damunt de l'atmosfera, car aquesta constitueix un filtre molt efectiu per a la radiació de longituds d'ona curtes (més petites que 3.000 Å). El programa de la campanya Solar Maximum Year (SMY) tracta d'obtenir suficient informació, de les observacions, per tal de resoldre els problemes següents:

- a) Quina és la causa que produeix les fulguracions?
- b) Quin és el mecanisme que les excita?
- c) A quin lloc (cromosfera o corona) comença l'alliberament d'energia?
- d) Quants tipus de *flares* hi ha?
- e) Quina influència exerceixen sobre el medi interplanetari i la magnetosfera terrestre?

Per tal de trobar una resposta a totes aquestes preguntes s'ha d'aconseguir informació del fenomen en tot l'espectre electromagnètic *al mateix temps* (fig. 5), ultra aconseguir el nombre suficient de successos per tal de disposar d'una bona mostra estadística.

L'observació des de la Terra s'ha fet efectiva amb la realització de tres programes diferents:

- 1) Flare Building up Study (FBS), que tracta d'obtenir informació sobre la qüestió a) a través de vuit seqüències d'observació diferents.
- 2) Study of Energy Release in Flares (SERF). Les seqüències d'observació

d'aquest programa tractaran de respondre les qüestions b), c) i d).

- 3) Study of Travelling Interplanetary Phenomena (STIP), que s'orienta a respondre la qüestió e).

Tots aquests programes estan coordinats per l'Observatori de Meudon (París) i per l'Space Environment Services Center (Boulder, EUA), els quals cada dia comuniquen als observatoris participants en quina regió del Sol hi ha més probabilitat que aparegui una *flare*. Com a exemple d'observació des de la Terra hi ha la participació espanyola per part de la secció solar de l'Institut d'Astrofísica de les Canàries. Des del primer de juny i fins al 30 d'octubre s'ha estat observant el Sol fotogràficament, sense parar, en la zona de l'espectre visible: llum blanca (llum provinent de tot l'espectre visible) i en llum de H α (corresponent a una longitud d'ona de 6563 Å). Els instruments emprats han estat dos telescopis: un de distància focal curta, 1,2 metres, amb el qual s'obté la imatge de tot el disc solar al negatiu, i l'altre, de 35 metres de distància focal, que correspon a uns 4 minuts d'arc quadrats al negatiu (vegeu fotos). S'han obtingut unes 30.000 fotografies, el 80 per cent de les quals corresponen a seqüències ininterrompudes durant dies sencers.

EL SATÈL·LIT "SOLAR MAXIMUM MISSION" (SMM)

L'observació en longituds d'ona més curtes s'ha aconseguit gràcies al satèl·lit SMM, especialment dissenyat per a observació solar. Aquest observatori va ser llançat a l'espai el 14 de febrer del 1980 i posat en una òrbita circular de 575 km sobre la superfície terrestre amb una inclinació de 28,5°; dona un tomb a la Terra cada 96 minuts i per tant només està sobre observatoris terrestres durant una petita fracció d'aquest temps. Això

Figura 5
L'espectre electromagnètic cobert pels observatoris participants al SMY

Figura 6
Satèl·lit "Solar Maximum Mission" amb els instruments d'observació solar

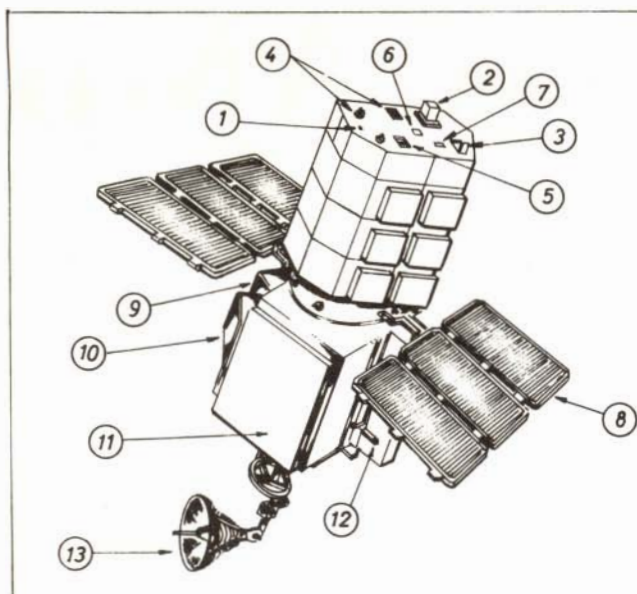
comporta la necessitat de disposar d'un sistema de recollida i emmagatzematge temporal d'informació en el satèl·lit mateix que s'aconsegueix mitjançant una cinta magnètica.

El satèl·lit està pensat perquè pugui ser utilitzat en altres treballs, de manera que els sistemes de control propis del satèl·lit, l'alimentació i l'emmagatzematge temporal d'informació són instal·lats en un mòdul reutilitzable, completament a part dels aparells d'observació solar (fig. 6). Dos plafons solars proporcionen els 3 kW de potència necessaris per a fer treballar els equips; quan el satèl·lit es troba a l'ombra de la Terra, unes bateries de cadmi-níquel s'encarreguen de l'alimentació.

El mòdul observatori, que pesa 590 kg i gasta 200 W, porta set instruments, alguns dels quals són dels més sofisticats que mai s'hagin llançat a l'espai. El control dels aparells, així com les seqüències d'observació, està realitzat per microprocessadors que segueixen les instruccions dels observadors des del Goddard Space Flight Center. Aquest mòdul porta els següents aparells:

1) *Radiòmetre*. Consta de tres detectors (piroheliòmetres) que mesuren el flux de radiació solar entre longituds d'ona corresponents a les llums ultraviolada i infraroja llunyanes, amb una precisió millor que 0,1 per cent. Dissenyat pel Jet Propulsion Laboratory.

2) *Coronògraf-Polarímetre*. Aquest instrument pren mesures de la corona solar amb l'ajuda d'un disc que produeix un eclipsi artificial de sol, des d'1,7 fins a 6 radis solars. Capta radiació de longituds d'ona des de 4.400 fins a 6.600 Å. Amb una càmera vidicon pren imatges del Sol de 896x896 elements. Té també la possibilitat de treballar amb set filtres dife-



- ① Radiòmetre
- ② Coronògraf polarímetre
- ③ Espectròmetre ultraviolat
- ④ Espectròmetre dual de raigs X
- ⑤ Espectròmetre de raigs X energètics
- ⑥ Fotòmetre de raigs X energètics
- ⑦ Fotòmetre de raigs X
- ⑧ Plafons solars
- ⑨ Sistema auxiliar d'alimentació
- ⑩ Unitat de control
- ⑪ Comunicacions i emmagatzematge de dades
- ⑫ Sistema auxiliar de control
- ⑬ Antena de guany alt

rents i tres polaritzadors. L'aparell, l'utilitza un equip del High Altitude Laboratory a Boulder.

3) *Espectròmetre-Polarímetre de llum ultraviolada.* Consisteix en un telescopi reflector que obté imatges del Sol de 4 minuts d'arc quadrats amb una resolució mínima de 3 segons d'arc. L'espectròmetre pot seleccionar ratlles espectrals diferents, entre 1.100 i 3.000 Å, que s'originen a profunditats desiguals a la cromosfera i corona, i arriba a observar la ratlla del MgII a 2.800 Å formada a la baixa cromosfera. És la primera vegada que s'intenta mesurar la polarització de la radiació en aquestes ratlles de l'espectre. Aquest instrument ha estat dissenyat per un equip del Marshall Space Flight Center de la NASA.

4) *Espectròmetre dual per a raigs X poc energètics.* Dissenyat i contruït per equips del Mullard Space Science Laboratory (Univ. College de Londres), de l'Appleton Laboratory (del SRC anglès) i del Lockheed's Palo Alto Observatory (EUA). És sensible als raigs X entre longituds d'ona d'1,4 a 22,4 Å, que corresponen a plasmes a temperatures d'1,5 a 50 milions de graus. Consta bàsicament de dos espectròmetres: l'un, dona una bona resolució espacial (escombra el Sol en trossos de 7 minuts d'arc quadrats amb resolució de 10 segons d'arc), i l'altre dona una bona resolució temporal (de 0,1 a 10 segons).

5) *Espectròmetre de raigs X energètics.* Instrument sensible als raigs X d'energies entre 3,5 i 30 KeV en sis canals diferents. El detector consta de 512 comptadors proporcionals (els més resolutius espacialment són de 8 segons d'arc i d'altres són més grossos, de 32 segons d'arc) que donen simultàniament imatges d'un camp de 6,5 minuts d'arc quadrats. És construït i dissenyat per equips de la Universitat de Birmingham i de la Universitat d'Utrecht.

6) *Fotòmetre de raigs X energètics.* Aquest instrument detecta raigs X d'energies fins a 300 KeV amb una constant de temps molt petita: 10 mil·lisegons. No té reso-

lució espacial i per tant dona informació de tot el Sol a la vegada. És a càrrec del personal del Goddard Space Flight Center de la NASA.

7) *Espectròmetre de raigs γ.* Instrument que detecta la radiació més energètica d'entre tots els instruments del SMM. És sensible a energies de 0,3 fins a 100 MeV. L'han construït equips del Max Planck Institut, de la Universitat de New Hampshire i del Naval Research Laboratory.

Fins ara, el SMM ha estat un èxit brillant, perquè tots els instruments han funcionat perfectament i s'ha pogut obtenir informació simultània de més de 200 *flares*. És la primera vegada que s'obtenen dades d'aquesta mena, el que aportarà llum sobre els processos d'acceleració de partícules a altes energies així com la localització d'aquests processos, que són la clau per a explicar els mecanismes que tenen lloc en el brutal alliberament d'energia que es produeix a les *flares*. Aquestes dades, juntament amb les obtingudes pels observatoris terrestres en longituds d'ona més llargues (visible, infraroig i ràdio), constituïran la màxima informació que és possible obtenir de l'espectre electromagnètic d'una *flare*. Tota la informació arreglada serà exhaustivament estudiada per grups de treball on participaran científics de totes les entitats que han col·laborat en la campanya Solar Maximum Year. Està previst que la campanya s'acabi pel febrer del 1981.

Si no perdem de vista que el Sol és una estrella més d'entre les que poblen l'univers, l'èxit de la campanya SMY, en poder explicar el fenomen *flare*, animarà i ensenyarà el camí a seguir per a arribar a comprendre fenòmens encara més violents que tenen lloc en altres estrelles i altres galàxies. La seva llunyania de la Terra és el problema més greu, però no hi ha dubte que amb l'esforç conjunt de la comunitat astronòmica internacional s'anirà trobant la solució d'aquests pro-

blemes.

(T. Roca i Cortés i Ll. Tomàs i Roig)

Materials de lectura

L'Univers. Publicacions de l'Abadia de Montserrat, Barcelona.

El Sistema Solar. Col. "Grandes Temas", ed. Salvat, Barcelona.

El Sistema Solar. Scientific American, ed. Blume, Barcelona.

Una estrella llamada Sol. G. Gamow, col. "Ciencia y Técnica", ed. Espasa Calpe.

Solar Flares. Z. Svestka. Rediel Publishing Corporation. Holland, 1976.

A New Sun. John A. Eddy, NASA, 1979.

Sunspots. R.J. Bray and R.E. Loughhead. Chapman and Hall Ltd, London, 1964.

Nota.— Aquest article fou escrit durant l'octubre del 1980. Poc després, el 15 de novembre, començaren a fallar els fusibles de la unitat de control i el 13 de desembre aquesta unitat deixà de funcionar. Actualment, el satèl·lit no pot apuntar al Sol amb precisió, el que significa que només treballa el fotòmetre de raigs X energètics. El SMM és el primer satèl·lit modular que s'ha fet i sembla que la NASA té el projecte de canviar el mòdul espatllat amb una missió de la nau "Columbia", que ha estat provada recentment amb èxit.