

EL SOL DES DE L'ESPAI

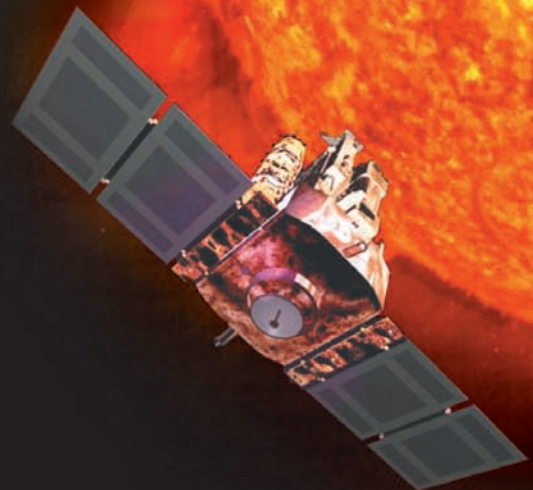
Vicent Domingo* i Enric Marco**

EN ELS DARRERS ANYS, UNA FLOTA DE SATÈL·LITS ARTIFICIALS ESTÀ PRODUINT UN GRAN AVANÇ EN EL CONEIXEMENT DEL NOSTRE ESTEL. COMENCEM A ENTENDRE L'ATMOSFERA CALENTA DEL SOL, LA QUE ENS ENVIA ELS RAIGS X I ULTRAVIOLATS I LES PARTÍCULES QUE INFLUEIXEN EN L'ESTAT I COMPOSICIÓ DE L'ALTA ATMOSFERA TERRESTRE I L'ENTORN EN QUÈ ES MOUEN ELS SATÈL·LITS. ENCARA NO L'ENTENEM, PERÒ COMENCEM A TENIR DADES DE L'INTERIOR DEL SOL I DE LA SEUA EVOLUCIÓ. SABEM ARA QUE L'ENERGIA QUE ENS ENVIA ÉS VARIABLE I ESTÀ RELACIONADA AMB L'ACTIVITAT MAGNÈTICA. AIXÍ, LA VARIACIÓ DE L'ACTIVITAT MAGNÈTICA OBSERVADA HISTÒRICAMENT SEMBLA ESTAR RELACIONADA MITJANÇANT DIVERSOS MECANISMES AMB LA VARIACIÓ DEL CLIMA A LA TERRA.

■ EL SOL DES DE L'ESPAI

L'ésser humà sempre s'ha interessat per entendre el Sol, perquè s'ha adonat que la nostra existència depèn d'ell. Des que Galileu va veure que el Sol mostra taques i que aquestes canvien en el temps, se sap que el nostre estel té una estructura canviant. Des del segle XVIII s'han comptat les taques cada dia i s'ha vist que el seu nombre varia amb un període d'onze anys. Amb el desenvolupament de l'espectroscòpia en els segles XIX i XX es va progressar molt en el coneixement del Sol. Per exemple, es va poder veure que a la fotosfera, la capa que veiem, que és la més profunda de l'atmosfera solar, i que es troba a uns sis mil graus, sempre hi ha formacions de camp magnètic que canvien molt en el temps. A més es constatà que el Sol té una atmosfera tènue molt calenta, que arriba fins a alguns milions de graus.

L'atmosfera calenta del Sol, anomenada corona, és difícil de veure des de la superfície terrestre perquè a les altes temperatures en què es troba emet la major part de la llum en l'ultraviolat i en altres longituds d'ona encara més curtes, com l'extrem ultraviolat i els raigs X, i aquestes ones lluminoses són detingudes per l'atmosfera terrestre. Amb l'adveniment dels satèl·lits va ser possible estudiar el Sol en totes les longituds d'ona de l'espectre electromagnètic. Nombrosos observatoris solars des de l'espai en els últims trenta anys del segle XX ens han permès complementar en molts aspectes els coneixements que ens proporcionen els observatoris que operen a la Terra, com ara a Tenerife i La Palma. Els últims progressos han estat obtinguts per satèl·lits que encara estan en ope-



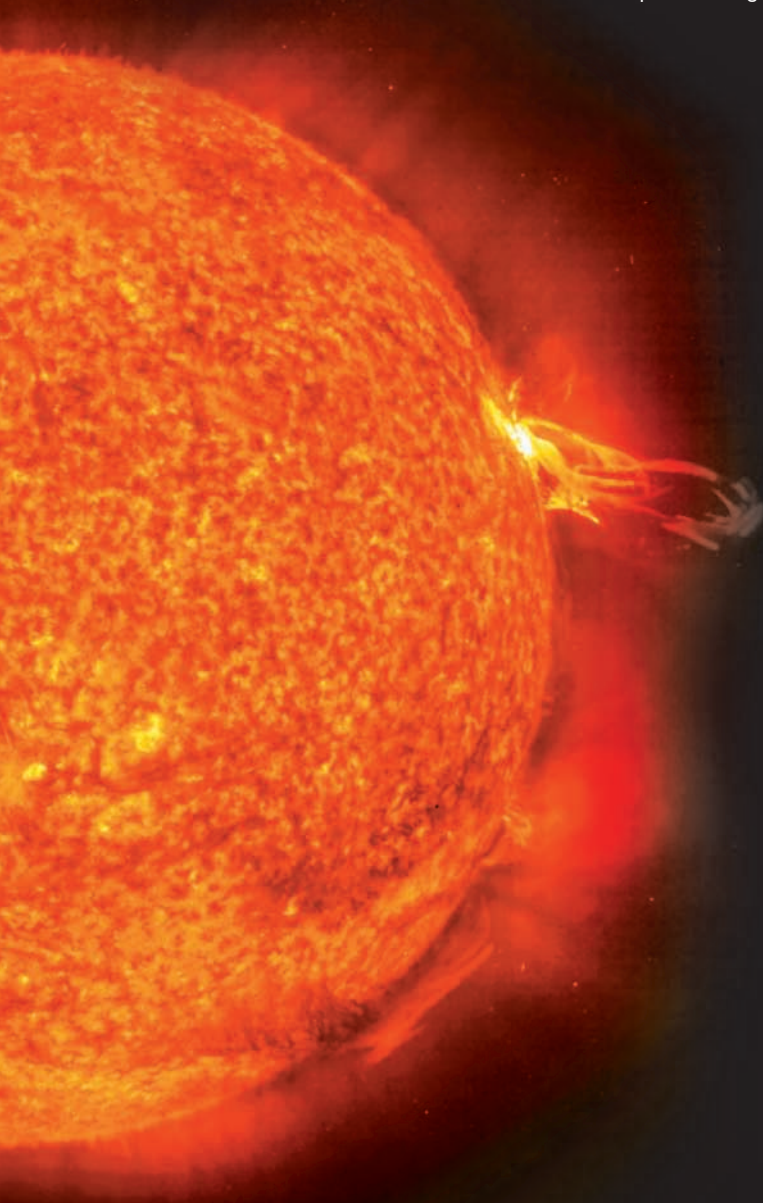
ració: el japonès Yohkoh (*sol naixent*), especialitzat a estudiar la part més calenta de l'atmosfera solar, amb telescopis de raigs X, des de 1991, i sobretot, l'Observatori del Sol i l'Heliosfera (SOHO), un projecte europeu/nord-americà molt ambiciós amb instruments que estudien l'interior del Sol, l'escalfament de l'atmosfera, així com el vent solar, des de 1996, completat des de 1998 pel petit satèl·lit nord-americà Trace, que estudia, en coordinació amb SOHO i Yohkoh, la dinàmica de l'atmosfera solar i produeix pel·lícules amb imatges de gran resolució espacial de l'atmosfera solar. Una propietat del Sol que només va

poder ser estudiada des de l'espai és l'emissió del vent solar, expansió del gas ionitzat que forma la corona i omple l'espai, anomenat heliosfera, que envolta el Sol fins a més de 100 vegades la distància del Sol a la Terra.

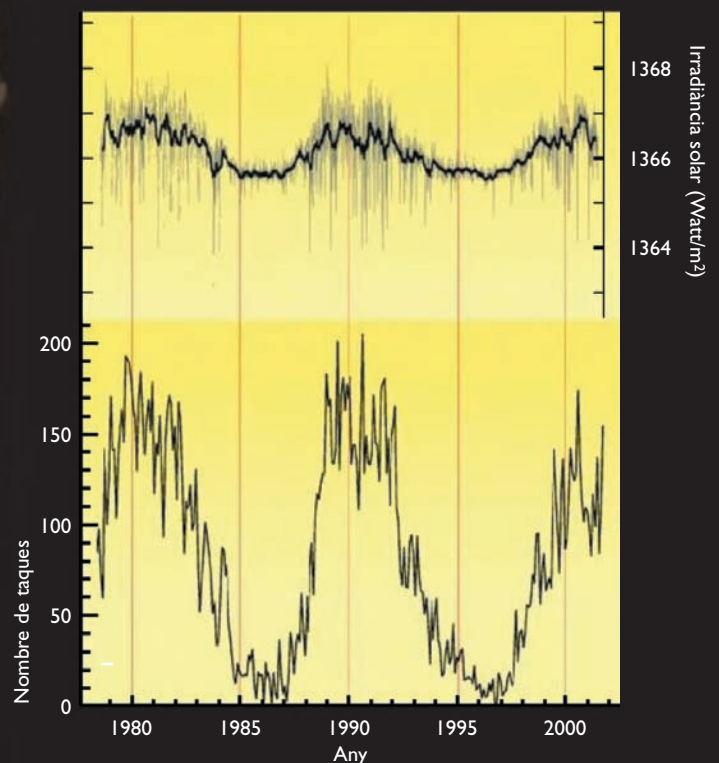
■ L'ACTIVITAT SOLAR

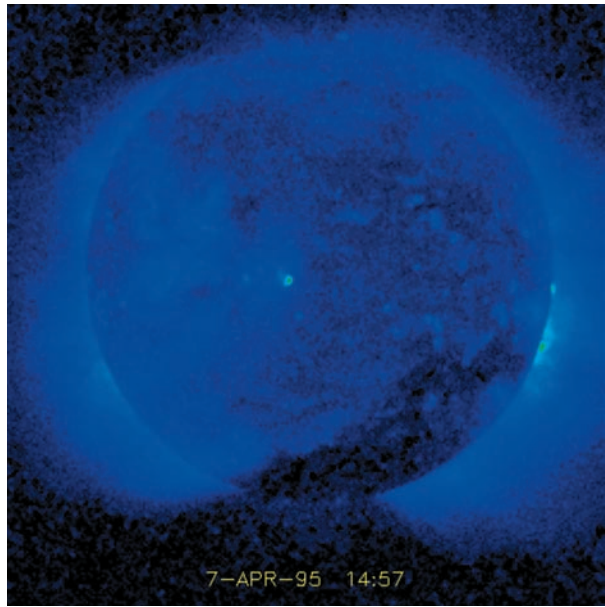
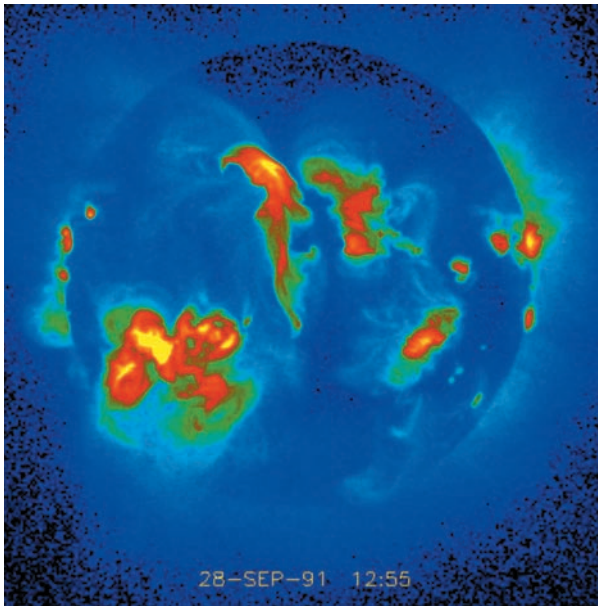
Es coneix des de fa anys que l'atmosfera solar és més activa quan hi ha moltes taques i se sap que el Sol passa per un mínim i per un màxim d'activitat cada onze anys. SOHO, que estudia la part on s'escal-

A l'esquerra, el satèl·lit SOHO es veu al costat del Sol observat en la línia He II a 304 àngstroms en ultraviolat extrem en aquest muntatge.

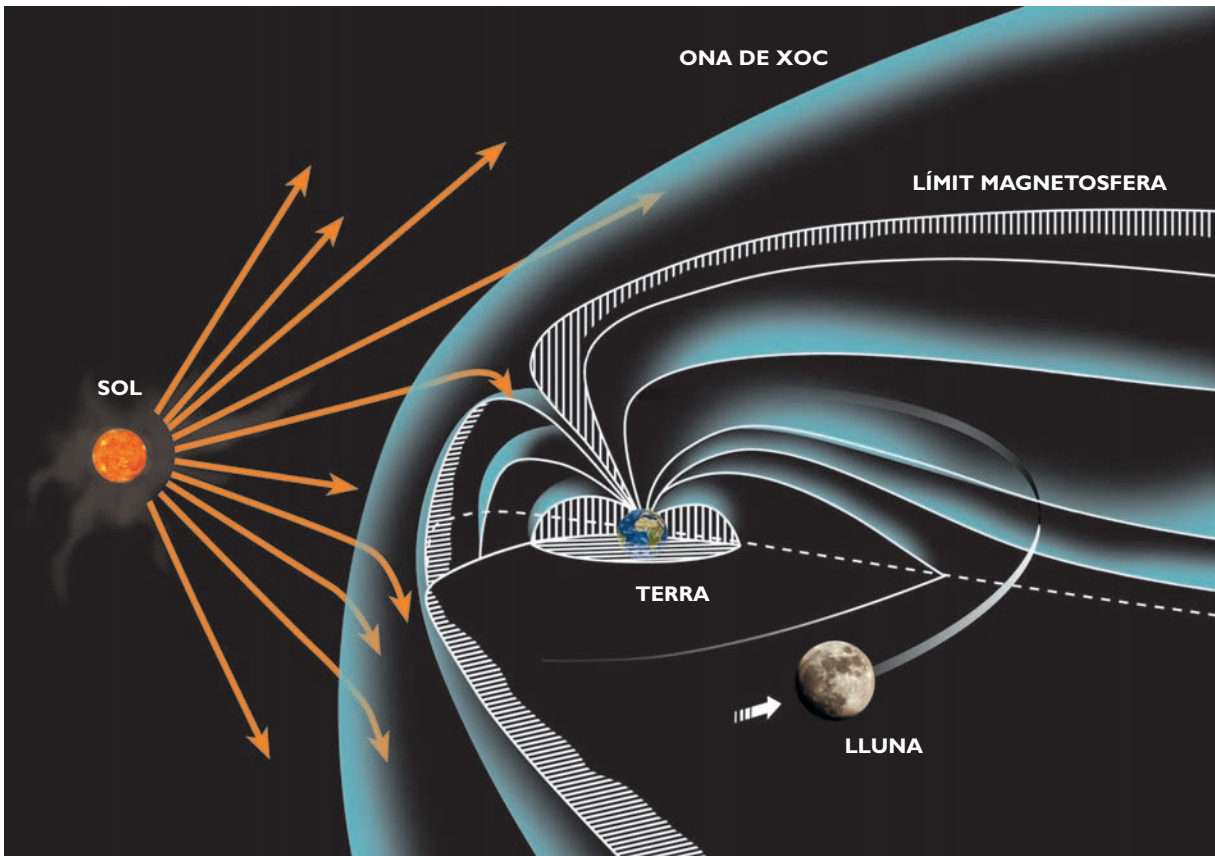


A sota, la irradiància total que rebem del Sol, anomenada tradicionalment "constant solar", començà a mesurar-se amb satèl·lits el 1978. Gràcies a les mesures obtingudes sense interrupció per diversos satèl·lits, avui coneixem la seua variació durant més de dos cicles solars. La irradiància és màxima quan l'activitat solar es màxima. Fins avui no hi ha una explicació completa de l'origen d'aquesta variació. S'ha pogut demostrar que una gran part és causada per la presència de línies de força magnètiques a la fotosfera solar, que modifiquen les característiques de transmissió i d'emissivitat de les capes més altes de la fotosfera, però no és evident que tota la variació pugui ser explicada d'aquesta manera. Aquesta quantitat és una component essencial per a l'estudi del clima terrestre. La variació observada en els dos cicles solars per als quals tenim dades no és prou important perquè es reflectisca en el clima, però per ara no podem mesurar si també varia a més llarg termini. El fet que l'energia que rebem del Sol estiga lligada a l'activitat magnètica pot explicar, per exemple, que la pràctica desaparició de les taques del Sol, entre 1645 i 1715, coincidira amb un període extremament fred a tot Europa. La mesura del nombre de taques és el referent obligat com a indicatiu de l'estat d'activitat del Sol.





Imatges de l'atmosfera solar fetes per Yohkoh, que és sensible a radiacions produïdes a 2 milions de graus, l'una obtinguda al voltant del màxim d'activitat solar cap a 1990, i l'altra al voltant del mínim de 1996. Els colors s'han elegit per a ressaltar la intensitat de la radiació.



El vent solar en passar per la Terra es troba amb el seu camp magnètic. De la interacció amb el vent solar surt l'anomenada magnetosfera, que és com una cavitat que conté ions i electrons en capes i corrents dominats pel dipol magnètic terrestre. El vent solar només pot entrar indirectament pels punts on el camp magnètic del Sol que porta els vents es connecta amb el camp magnètic de la Terra. La imatge, no a escala, mostra el Sol, el vent que n'ix, la Terra envoltada per la magnetosfera i la Lluna.

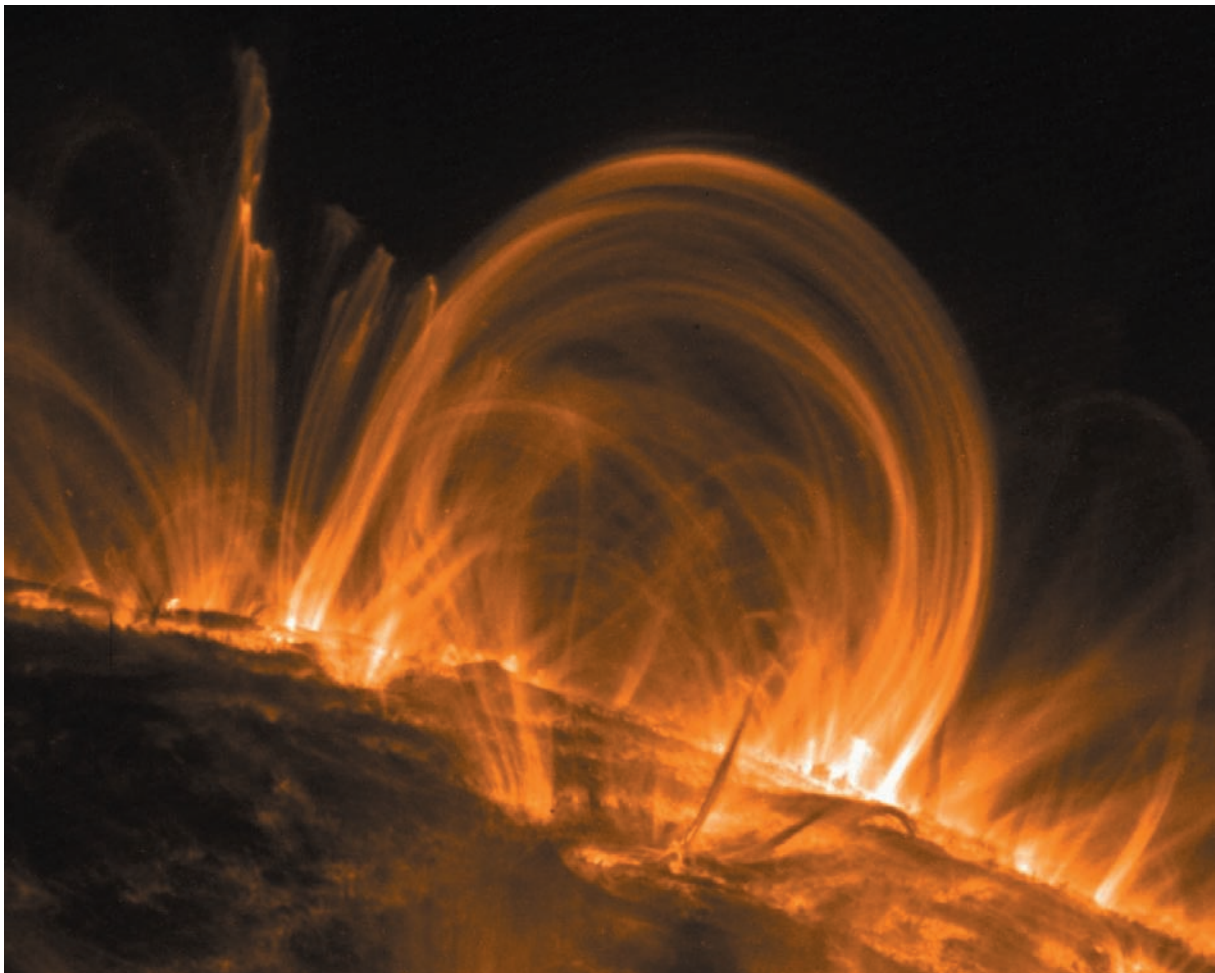
fa la corona, ha demostrat que, realment, l'atmosfera solar sempre està en moviment: l'observació contínua del camp magnètic fotosfèric ha permès mesurar que els petits elements magnètics que contínuament es veuen a la superfície del Sol es renoven aproximadament cada 40 hores.

Però, per damunt d'aquesta activitat regular, al llarg del cicle solar apareixen regions actives, que es caracteritzen per presentar a la fotosfera forts camps magnètics, que produeixen taques fosques, les mateixes que va descriure Galileu, així com arcs a la corona que es troba damunt i que vists amb raigs ultraviolats i X són molt brillants i es troben en constant moviment. La formació i estabilitat dels arcs que hi ha a la corona

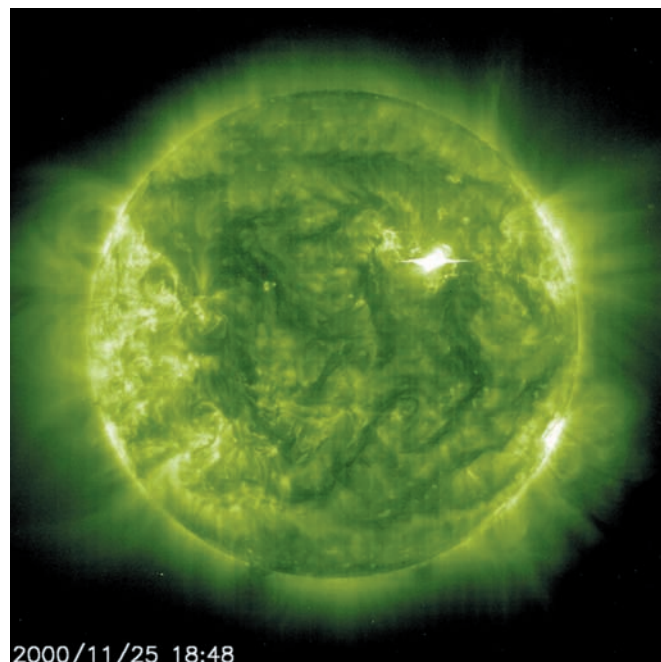
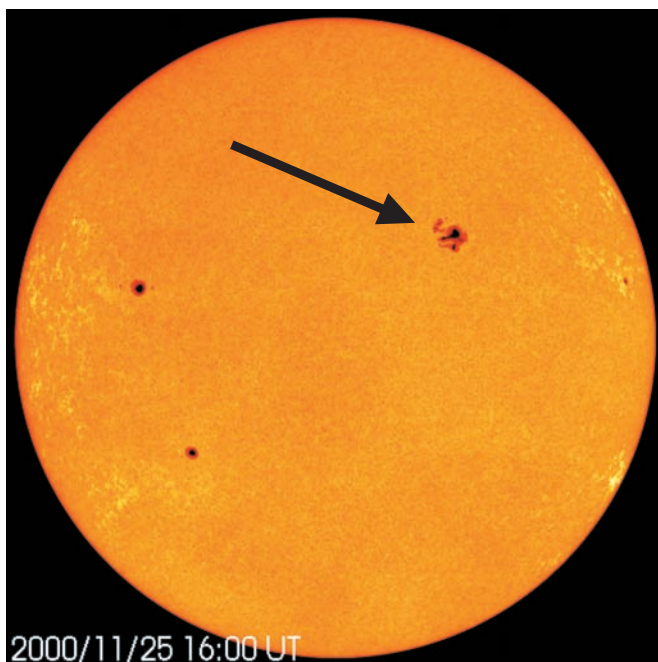
**«DES QUE GALILEU VA
VEURE QUE EL SOL MOSTRA
TAQUES I QUE AQUESTES
CANVIEN EN EL TEMPS, SE
SAP QUE EL NOSTRE ESTEL
TÉ UNA ESTRUCTURA
CANVIANT»**

solar és objecte d'investigació per a nombrosos grups d'arreu del món, perquè són un laboratori únic per a estudiar el plasma (gas ionitzat) en un ambient magnetitzat, que és freqüent a l'univers però que no es pot reproduir als laboratoris terrestres actuals. Les mesures obtingudes per SOHO i les imatges o pel·lícules fetes per Trace ens

han aproximat en gran mesura al seu coneixement. Els arcs són mantinguts per línies de camp magnètic arrelades a la fotosfera, una arrel a cada peu de l'arc: el camp magnètic que va d'una arrel a l'altra es comporta com si fóra una botella que conté gas ionitzat. Com que hem vist que els camps magnètics a la fotosfera estan en continu moviment, això fa que aquests



Aquesta imatge, obtinguda amb raigs ultraviolats extrems, d'una regió magnèticament activa al limbe del disc solar, mostra bucles que connecten pols oposats del camp magnètic en la superfície del Sol. L'activitat magnètica escalfa el gas a la base dels bucles a un milió de graus o més, i per això els bucles s'alcen cap amunt en l'atmosfera solar.



Dalt a l'esquerra, imatge del Sol en llum blanca, mostrant una regió activa (fletxa) a la superfície, anomenada fotosfera. Dalt a la dreta, a les 18:45 hores, imatge en raigs ultraviolats extrems (EUV) on es veu una fulguració per damunt de la taca. 13 hores després (pàgina següent a l'esquerra) l'ejecció de massa coronal que s'ha produït en aquest esdeveniment, s'estén a quatre milions de km del Sol, i 3 hores i mitja més tard arriba a més de 14.000.000 km (els colors de la imatge són arbitraris). A les dues últimes imatges el Sol està tapat per un disc, i un cercle blanc representa la grandària a què veuríem el Sol si no estiguera tapat.

Les ejeccions coronals de massa com aquesta que surt cap a l'oest solar són freqüents (una o dues per dia) i sovint van precedides per una ona de xoc. De tant en tant alguna ve cap a la Terra, i aleshores pot provocar grans perturbacions als sistemes de comunicació i instal·lacions elèctriques dels països nòrdics.

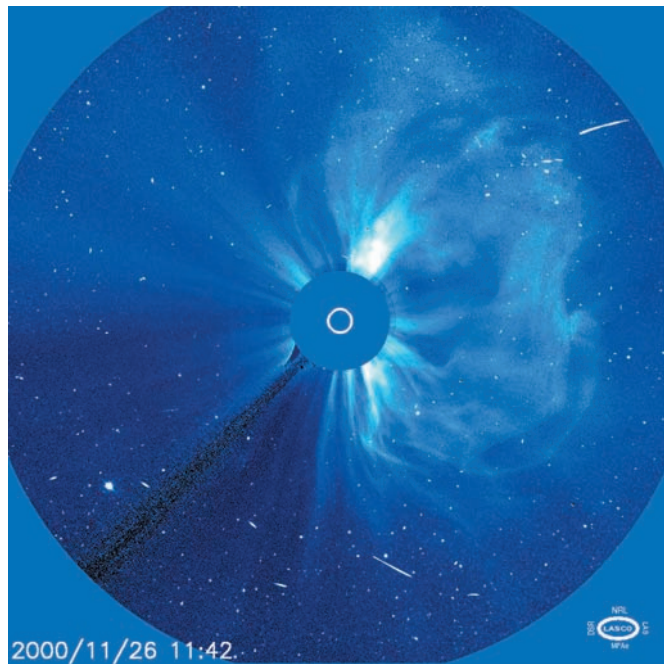
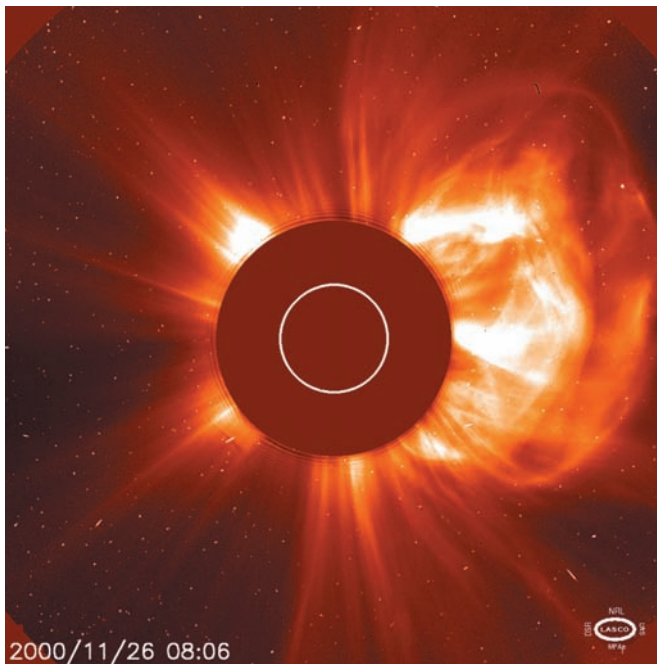
arcs també es moguen constantment amb dues conseqüències: d'una banda hi ha moviments aleatoris i també periòdics (és a dir, ones) que escalfen el plasma, motiu pel qual veiem els arcs més calents que la corona al seu voltant. D'una altra banda, de tant en tant, els arcs interaccionen entre ells. Si la interacció permet la reconexió de línies de camp magnètic de signe oposat, té lloc un alliberament d'energia magnètica que es transforma en energia cinètica i tèrmica. Tot això produeix una desestabilització local amb efectes molt variats segons l'estructura momentània de la zona. Es pot provocar la ruptura d'un o de molts arcs amb emissió de massa coronal (a partir d'ara, EMC). Si l'escalfament local és molt fort i localitzat en el temps i l'espai, es pot produir una fulguració acompanyada d'emissió de raigs X i gamma així com de partícules energètiques.

**«ENS INTERESSA EL VENT
SOLAR PERQUÈ ÉS
EL VEHICLE PER AL
TRANSPORT DEL MATERIAL
I DEL CAMP MAGNÈTIC
DE LA CORONA SOLAR FINS
A LA TERRA»**

Al SOHO hi ha un coronògraf, que és un telescopi que fotografia la corona solar, és a dir, l'atmosfera solar fins a grans distàncies del Sol (30 radis solars), cosa que pot fer perquè està dissenyat per fer eclipsis

total de Sol artificials permanents. Aquest instrument ha fet pel·lícules amb més de 4.000 EMC. Aquestes EMC, a banda d'estar compostes per un gran núvol de material coronal, desenvolupen, en propagar-se a través del vent solar, una ona de xoc que, quan arriba a la magnetosfera terrestre, provoca una tempesta magnètica amb conseqüències negatives en les telecomunicacions i els satèl·lits que hi ha al voltant de la Terra,

que poden arribar a ser destruïts. Avui, gràcies a les observacions coordinades del coronògraf i del telescopi en extrem ultraviolat, que veuen, un el desenvolupament de l'EMC, i l'altre el seu lloc d'origen, comencem a poder predir quan una tempesta magnèti-



ca va a produir-se. D'aquesta manera és possible que es prenguen mesures protectores, com, per exemple, apagar alguns dels sistemes elèctrics als satèl·lits operatius.

■ EL VENT SOLAR

L'atmosfera solar s'estén en forma d'un plasma, o gas ionitzat, que s'allunya del Sol. Aquest vent, predit per Hoffmeister i Biermann en la dècada dels 40 del segle passat per explicar el comportament de la cua dels cometes, va ésser mesurat per primera vegada per la sonda *Mariner 2* de la NASA el 1962, en el seu camí cap a Venus. El vent solar quan arriba a la Terra porta una velocitat mitjana de 450 km/s amb valors que van des de 250 a més de 1.000 km/s. La combinació de mesures fetes amb tres dels instruments de SOHO ha permès demostrar que la major part del vent ix de la xarxa magnètica que es troba entre els grànuls de la fotosfera.

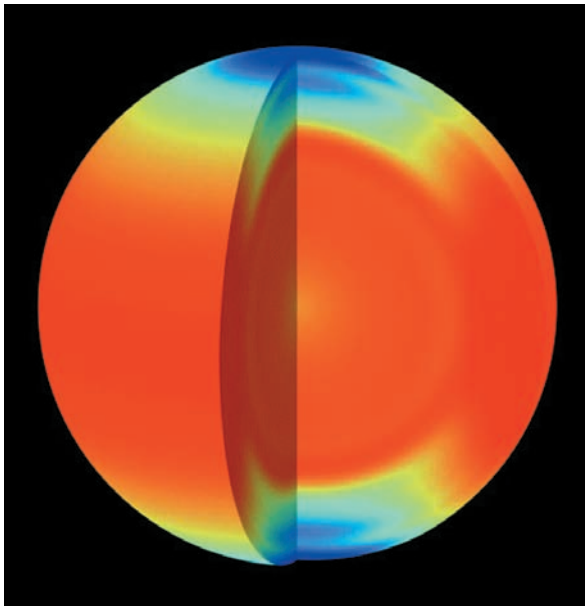
A banda de la seua generació, ens interessa el vent solar perquè és el vehicle per al transport del material i del camp magnètic de la corona solar fins a la Terra. El vent solar, com a conseqüència de la seua interacció amb el camp magnètic terrestre, forma la magne-

tosfera terrestre, l'espai al voltant de la Terra que, encara que dominat per l'imant terrestre, es troba sotmès a la influència del vent solar. Tots els canvis al vent solar es reflecteixen en canvis a la magnetosfera; així, quan arriba una EMC precedida d'un xoc al vent solar, es produeix una compressió de la magnetosfera amb la generació de corrents elèctrics i perturbacions magnètiques a tot arreu en l'espai al voltant de la Terra. Segons la seua importància, aquestes perturbacions poden tenir influències en diversos camps tècnics: les comunicacions de ràdio en ona curta es poden interrompre, els satèl·lits en òrbita geostacionària poden espatllar-se, o les conduccions elèctriques a altes latituds poden ser perturbades...

**«EL VENT SOLAR,
COM A CONSEQÜÈNCIA
DE LA SEUA INTERACCIÓ
AMB EL CAMP MAGNÈTIC
TERRESTRE, FORMA
LA MAGNETOSFERA
TERRESTRE.»**

■ L'INTERIOR

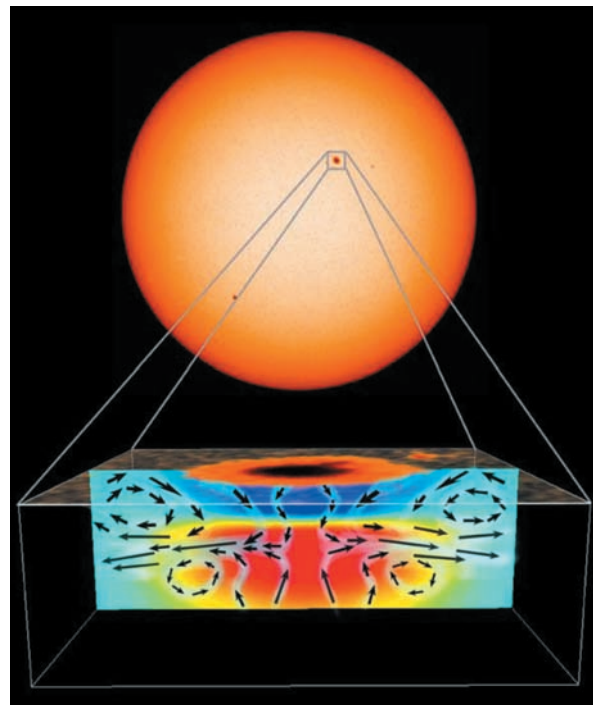
Mai no entendrem les variacions de l'activitat solar si no coneixem com és el seu interior i com es mou. L'estructura interna del Sol s'estudia experimentalment amb la tècnica de l'heliolismologia, que s'utilitza des de fa vint anys des d'observatoris terrestres. L'estudi sísmic del Sol ha tingut un avanç qualitatiu important gràcies al SOHO, que ha garantit la continuïtat de les mesures i a l'estabilitat de la seua qualitat: els tres instruments



L'estudi de les oscil·lacions de la superfície del Sol, produïdes per les ones acústiques que es propaguen a l'interior del Sol, està permetent als equips que treballen amb les dades obtingudes amb l'instrument MDI de SOHO calcular l'estructura i la dinàmica de l'interior del Sol. En aquesta imatge veiem la velocitat mitjana de rotació del fluid solar des de la superfície fins al centre. Els colors indiquen la velocitat de rotació: roig és més ràpid i el blau més lent que la mitjana. El gas, prop dels pols, gira al voltant de l'eix de rotació quasi un 25% més lentament que a l'equador i a l'interior més profund.

que mesuren les oscil·lacions del Sol en SOHO prenen una mesura cada minut des de fa sis anys, amb una sola interrupció de tres mesos en 1998 per problemes tècnics, i convé recordar que SOHO, que està situat entre la Terra i el Sol, no pateix cap mena d'eclipsi. El fet que es trobe fora de l'atmosfera terrestre també és particularment important per a l'instrument que observa les oscil·lacions, perquè les seues imatges no estan afectades per les irregularitats que produeix l'atmosfera. Les oscil·lacions que es mesuren a la superfície del Sol són degudes a la propagació d'ones acústiques al seu interior: per això del seu estudi es pot trobar informació sobre l'estructura interna del Sol i el que hi passa. La manera en què les capes internes del Sol giren al voltant del seu eix i els corrents que formen la granulació de la regió sota la fotosfera han estat determinades com mai abans, però els detalls dels progressos fets en aquest camp demanarien un article molt més llarg que el present.

Cal dir que estem parlant de tècniques que estan en la infantesa del seu desenvolupament, i que cal esperar encara importants progressos a mesura que s'anulitzen les dades acumulades pels instruments de



Sempre ha estat un problema teòric el perquè les taques solars, constituïdes per manolls de tubs de camp magnètic, són tan estables i poden durar des d'hores a setmanes. Per anàlisi heliosísmica de les mesures de l'instrument MDI de SOHO s'ha pogut "veure" sota la superfície de Sol els corrents que mantenen estable l'estructura de la taca.

SOHO al llarg dels últims set anys, i que encara continuen funcionant ininterrompudament. A més a més, l'èxit obtingut amb SOHO ha aconsellat el desenvolupament de nous observatoris que prendran el relleu de les observacions de SOHO amb instruments de nova generació. Així, es proposa que cap al 2007 es llançarà el Solar Dynamics Observatory (SDO) de la NASA amb la col·laboració de l'ESA, que portarà instruments per a aprofundir en els progressos d'avui, i més avant l'ESA, amb la col·laboració de la NASA, enviarà un observatori que anirà prop del Sol per fer mesures de la seua atmosfera amb més resolució i prendre mesures *in situ* del vent solar prop del seu origen. ☺

*Institut de Ciències dels Materials; Grup d'Astronomia i Ciències de l'Espai, Universitat de València

**Departament d'Astronomia i Astrofísica. Universitat de València

Totes les figures i dades han estat produïdes per investigadors dels instruments que formen part dels satèl·lits Yohkoh, de l'Institute for Space and Astronautical Sciences (ISAS), SOHO de l'ESA i de la NASA i TRACE de la NASA.

REFERÈNCIES

<http://sohowww.estec.esa.nl>

<http://www.solar.isas.jp/>

<http://vestige.lmsal.com/TRACE/>