



Conèixer com funciona el Sol, la relació entre el Sol i la Terra és fonamental per entendre les causes de l'escalfament global que ens afecta, ja que la temperatura al planeta depèn certament de la irradiació que rebem del Sol. Aquesta energia depèn a la vegada de la quantitat i del tipus de radiació que produeix el Sol però també de la posició de la Terra, de la seva distància al Sol i de la seva inclinació. Parlaré, doncs, d'aquests diversos factors, començant per l'energia pròpia que produeix el Sol.

El Sol és un estel de tipus G2V, en fase de seqüència principal. És a dir, que està produint energia per una reacció de fusió nuclear on els àtoms d'hidrogen (H) són transformats en àtoms d'heli (He). Els estels del tipus i de la massa del Sol tenen un període de seqüència principal d'uns 10.000 milions d'anys i s'estima que ens trobem més o menys a la meitat d'aquest període. Gràcies a models complexos d'evolució estel·lar, sabem que la seva lluminositat, és a dir, l'energia produïda pel Sol, augmenta el 10% cada 1.000 milions d'anys a causa de la pressió a l'interior, que augmenta per compensar la desaparició de l'hidrogen transformat en heli. Aquest augment afecta evidentment la temperatura a la superfície dels planetes que orbiten el Sol. Més concretament, per a la Terra, s'ha calculat que una variació d'1% de la lluminositat provocaria una augment d'entre 1 o 2 graus de la temperatura mitjana. Coneixem, doncs, que a molt llarg termini, a milions d'anys vista, el Sol provocarà que la temperatura del nostre planeta augmenti inexorablement fins que s'evaporin tots els oceans, amb la transformació del planeta en un món inhabitable de la manera que el coneixem actualment.

Però si bé aquest augment de la lluminositat és a molt llarg termini, també s'observen variacions menors en un cicle molt més curt del Sol en diferents períodes, el que s'anomenen *cicles solars*, que estan estretament

Joan Marc Miralles i Bellera

Doctor en astrofísica i astrofísic a l'Observatori de Rio de Janeiro, Brasil



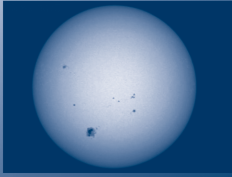
Joan Marc Miralles i Bellera

Factors astrofísics que poden incidir en el canvi climàtic



Àngels Mach i Buch llegint el text de la conferència.

El Sol amb taques solars



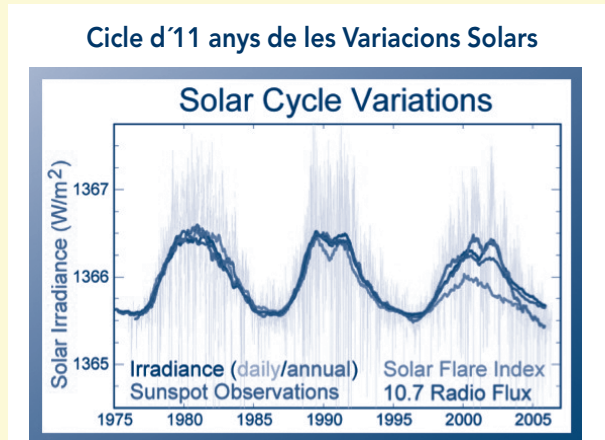
relacionats amb la variació del camp magnètic del Sol, si bé no existeix un model que descriu perfectament la relació entre l'activitat magnètica i la intensitat de la radiació solar. Coneixem diversos cicles de diferents períodes:

- Cicle d'11 anys: també anomenat *cicle de Schwabe*. Està relacionat amb l'increment i el decrement de taques solars en períodes d'11 anys.
- Cicle de 22 anys: també anomenat *cicle de Hale*. Durant aquest cicle el camp magnètic del Sol s'inverteix. Al cap de dos cicles, els pols magnètics retornen a les posicions originals.
- Cicle de 87 anys: també anomenat *cicle de Gleissberg*. Es creu que és una modulació del cicle d'11 anys.
- Cicle de 210 anys, o *cicle de Suess*.
- Cicle de 2.300 anys: Anomenat també *cicle de Halls-tatt*.

També s'han detectat d'altres cicles, principalment mirant l'abundància del carboni-14, que també és un indicador de l'activitat magnètica del Sol.

En el cicle d'11 anys, les variacions de la lluminositat del Sol són del voltant del 0,1%. Actualment la quanti-

Figura 1.
Canvis en la irradiació solar en els últims trenta anys correlatiu amb el nombre de taques solars, el flux ràdio i l'índex de tempestes solars.



tat mitjana de radiació solar que rebem és de 1.366 W/m^2 i les variacions que s'han observat fan que aquest valor variï entre $1.365,5$ i 1.367 W/m^2 .

Aquestes variacions corresponen perfectament al cicle de les taques solars que dura uns 11 anys, com es pot veure en la figura 1. Les taques solars són zones en la superfície del Sol on la temperatura és més baixa a causa d'una intensa activitat magnètica que inhibeix l'efecte convectiu. Els màxims d'irradiació corresponen als màxims de nombre de taques solars i els mínims d'irradiació, als mínims de taques solars. Aquestes variacions són, però, en un cicle massa curt perquè tinguin un efecte significatiu sobre el clima del nostre planeta, ja que els factors moderadors del clima, com els oceans, l'impedeixen pel simple efecte d'inèrcia tèrmica. Scafetta i West (2005) van trobar que el clima és 1,5 vegades més sensible al cicle solar de 22 anys, anomenat *cicle de Hale*, que al cicle d'11 anys de les taques solars. També van calcular que el retard en les variacions de temperatura introduït per la inèrcia tèrmica dels oceans és de 2,2 anys. S'han de considerar, doncs, els cicles més llargs quan es vol buscar una rela-

Taques Solars i Activitat magnètica

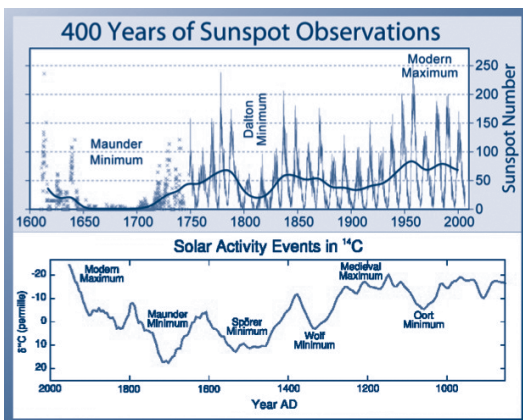


Figura 2. Observacions de les taques solars els últims 400 anys.

Figura 3. Variacions de l'activitat solar en funció de la producció de carboni-14.

ció entre les variacions de la intensitat solar i el clima. El que queda clar és que existeix una relació important entre el nombre de taques solars, i en general, l'activitat magnètica del Sol, amb la seva irradiació, i potser doncs també amb la temperatura a la superfície de la Terra.

Variacions de la temperatura mitjana en els últims 1.000 anys

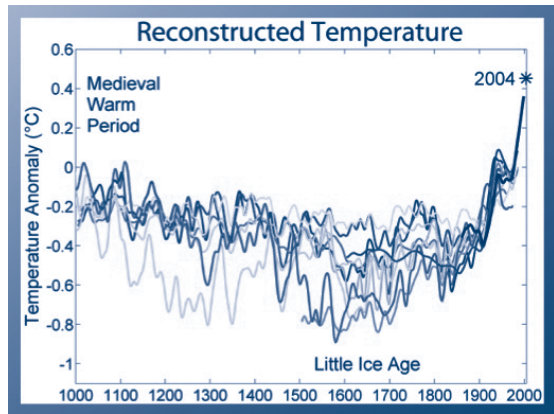


Figura 4.
Reconstrucció de les variacions de la temperatura mitjana els últims mil anys.

Si mirem les observacions històriques de taques solars o de variacions en el radiotop de carboni-14, en els últims 500 a 1.000 anys com veiem a les figures 2 i 3, trobem zones de mínims i màxims. En correlació amb el clima observat, que veiem a la figura 4, es nota que els mínims de Spörer (1450-1550) i Maunder (1645-1715) corresponen al període climàtic que s'anomena *petita edat de gel*, en el qual es té traça d'un refredament important tant a Europa com a Nord-amèrica, i possiblement a la resta del món. El màxim d'activitat solar de l'edat mitjana (1100-1250) coincideix parcialment amb el període de *l'edat mitjana temperada*, on la temperatura mitjana de la zona nord atlàntica va ser anormalment més elevada.

Actualment ens trobem en un màxim de l'activitat solar des del 1950 que també coincideix amb la constatació de l'elevació de la temperatura global del planeta. Aquest nivell d'activitat és d'una magnitud excepcional i només se'n troba un equivalent fa més de 8.000 anys. També podem dir que el nivell d'activitat magnètica actual ha ocorregut només durant un 10% del temps en els últims 11.400 anys i que quasi tots els períodes d'alta activitat varen ser inferiors als actuals. Alguns especialistes, per això, coincideixen a afirmar que és possible que els valors actuals de l'activitat solar són més alts que en el passat només perquè som capaços de mesurar-la amb més precisió.

Si fins ara he parlat únicament de la intensitat de la radiació solar o de la seva lluminositat, hi ha altres factors que s'han de considerar i que molt sovint desconexem per falta d'estudis aprofundits. Un d'aquests factors és, per exemple, el canvi en l'espectre d'emissió de la radiació solar, i en particular, les variacions en l'ultraviolat. S'estima que durant un cicle solar, la radiació UV que emet el Sol pot variar de 2 a 10 vegades. La llum ultraviolada té un efecte ionitzador en l'alta atmosfera terrestre que provoca una producció d'ozó més elevada i una elevació de la temperatura de l'estratosfera. S'estima que des del mínim de Maunder, la radiació UV ha augmentat un 3% de mitjana.

Un altre factor per considerar són les variacions del vent solar i del flux del camp magnètic solar que modifiquen la quantitat de raigs còsmics que rep la Terra. Aquesta radiació còsmica podria afectar la formació dels núvols a causa dels seus efectes ionitzants en la troposfera. Durant els últims cent anys, el flux magnètic del Sol s'ha doblat i el flux de raigs còsmics ha disminuït un 15%. Al mateix temps s'han observat disminucions de l'albedo de la Terra, és a dir, de la llum reflectida per la Terra, principalment a causa de menys nuvolositat.

Si bé fins ara he presentat els factors que depenen únicament del Sol, no hem d'oblidar que pel que fa al clima, existeixen factors astrofísics que depenen també de la Terra i que estan lligats a la seva posició en el sistema solar, a la seva òrbita i a la seva inclinació. Aquests factors incideixen directament en la quantitat d'irradiació solar que rebem a la superfície de la Terra. Segons l'enginyer civil i matemàtic serbi Milankovitch, l'excentricitat, la inclinació axial i la precessió de l'òrbita de la Terra varien en el transcurs del temps i van produir les glaciacions del quaternari cada 100.000 anys. L'eix de la Terra completa el seu cicle de precessió cada 25.800 anys. Al mateix temps, l'eix major de l'òrbita el·líptica de la Terra al voltant del Sol canvia en uns 22.000 anys entre l'hivern i l'estiu. A més, la inclinació de l'eix de la Terra fluctua entre 21,5 i 24,5 graus en un cicle de 41.000 anys. L'eix de la Terra té ara una inclinació de 23,5° respecte al pla de l'eclíptica.

Cicle de Milankovitch

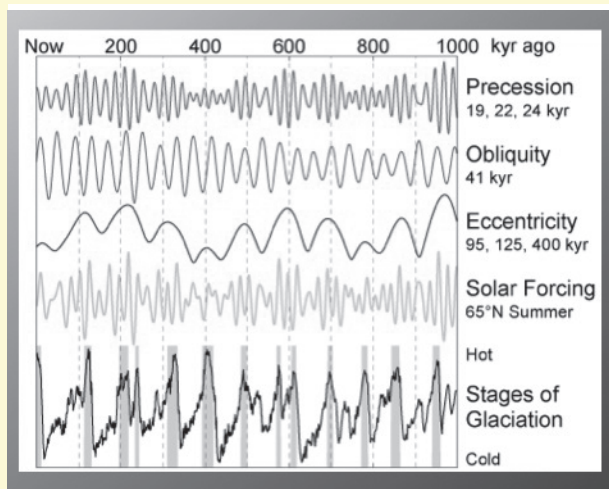


Figura 5.
Il·lustració dels cicles de
Milankovitch.

La teoria de Milankovitch encara presenta alguns interrogants. Si bé és clar que els moviments de l'òrbita i de l'eix de la Terra tenen incidència directa sobre la quantitat i la localització de la irradiació rebuda del Sol (el Solar Forcing en la figura 5), les variacions de 100.000 anys de Milankovitch no es corresponen exactament amb les variacions de la irradiació. S'ha de ressaltar, però, que Milankovitch no va considerar en els seus càlculs la inclinació de l'òrbita de la Terra en funció del que podríem anomenar un *pla fix*. Aquesta inclinació varia en cicles de 100.000 anys i podrien ser un factor determinant en els períodes glaciaris. També s'ha de considerar que existeixen en aquest *pla fix* una quantitat important de pols i restes planetaris, com ara petits asteroides, que també podrien afectar la quantitat de radiació que rebem del Sol. Actualment la Terra travessa aquest *pla fix* entre el 9 de gener i el 9 de juliol, fase durant la qual es veuen més meteorits. En les condicions actuals, segons el cicle de Milankovitch, ens trobaríem en una fase descendent de les temperatures i a les portes d'un nou període glacial. La posició del punt més pròxim al Sol en la nostra òrbita, anomenat *periheli*, és durant l'estiu de l'hemisferi sud, fet que suposaria que les estacions al sud fossin més extremes que al nord. La diferència de distància en relació amb el Sol durant l'estiu fa que hi hagi una diferència de 6,8% en la irradiació solar entre l'estiu al sud i al nord del planeta. Recentment s'ha posat en evidència a Mart un augment progressiu de la temperatura que correspondria també a mínim de la distància entre Mart i el Sol, cosa que tendria a provar la importància d'aquests factors per al clima global d'un planeta.

Aquests són, doncs, en resum els factors astrofísics que podem considerar que tenen un impacte sobre el clima del nostre planeta. La importància d'aquests efectes és per això encara molt controvertida i existeixi-

xen tants estudis que intenten demostrar que són factors fonamentals com que són molt secundaris en comparació dels factors de l'activitat geològica o humana. És important seguir investigant i provar d'entendre a fons les relacions del nostre planeta amb l'estel que ens escalfa, el Sol, i el nostre veïnatge còsmic. Existeix un consens per admetre, però, que les condicions actuals d'augment de la temperatura tenen poca o nul·la relació amb els factors astrofísics que incideixen en el clima i que els culpables de l'escalfament global del planeta s'han de buscar més a prop de casa nostra.

Voldria acabar donant les gràcies a l'Àngels per llegir el text en lloc meu; a l'Àngels (una altra vegada), a l'Èric Jover i a la SAC per invitar-me a participar en aquests interessants debats des de la distància. Vull agrair també a la meva esposa, Tina, i a la meva família el suport en tot instant. Finalment, vull agrair molt particularment a l'empresa Tècniques d'Avantguarda el seu suport i ajut a la recerca astrofísica andorrana.