



astroterrassa.org

Jaume Calaf, AAT

El Sol, la Terra i les aurores polars

Les tempestes geomagnètiques: què són, què les causen i com afecten

- →1 El Sol
- →2 El camp magnètic del Sol
- →3 La Terra i el seu camp magnètic
- →4 Moviment de les càrregues en el camp magnètic terrestre
- →5 Les aurores polars
- →6 Les tempestes solars
- →7 Les tempestes geomagnètiques
- →Alguns científics solars. Webs recomenats

1. El Sol, entre totes les estrelles



El tipus espectral és una classificació estel·lar que es basa en la temperatura superficial de l'estrella i les característiques del seu espectre, incloent-hi la presència de certes línies espectrals que indiquen la composició química de l'atmosfera de l'estrella. Aquestes característiques són determinants per la seva lluminositat, color, i d'altres propietats físiques que, d'altra banda, estan determinades per la massa de l'estrella. Els principals criteris que determinen el tipus espectral són:

- Temperatura de la superfície. Les estrelles es classifiquen en diferents tipus espectrals (O, B, A, F, G, K, M) basats en la seva temperatura superficial, que va des de les més calentes (les O i B, les més massives) a les més fredes (les K i M, les menys massives). El Sol és una estrella de tipus G, que correspon a estrelles amb una temperatura superficial entre 5300 i 6000 K.
- Línies espectrals. Les línies d'absorció en l'espectre d'una estrella indiquen la presència de certs elements químics a la seva atmosfera. Aquestes línies ajuden a determinar el tipus espectral més específic dins de les categories generals.

Per ex., el tipus espectral G2V del Sol indica una temperatura específica i la presència de línies espectrals corresponents a elements com l'hidrogen, l'heli, el calci, i altres.

- Lluminositat relativa. Les classes van des de I (supergegants) fins a V (nanos de la seqüència principal). El Sol és de classe V.

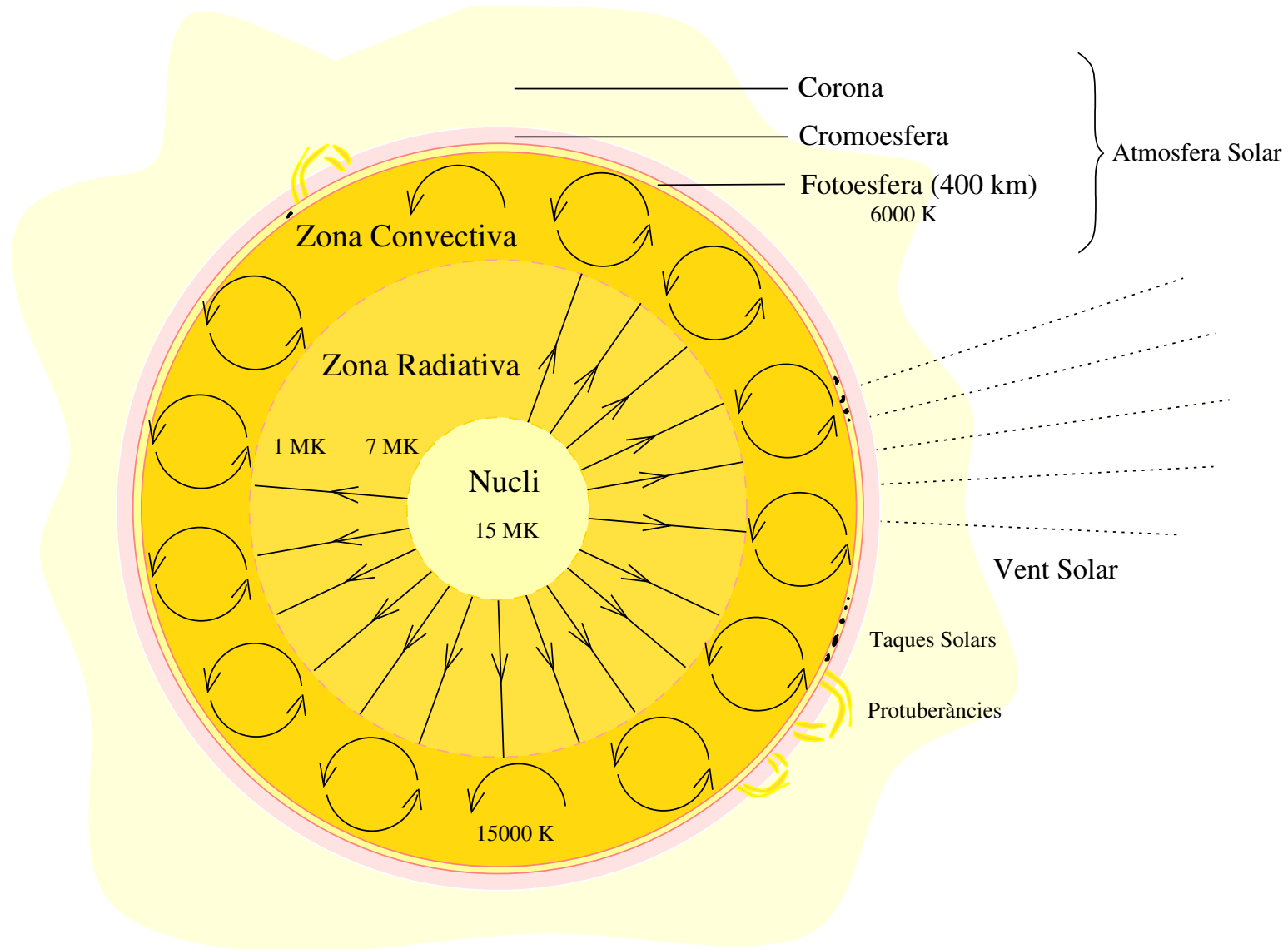
En general, hi ha relació empírica aproximada entre la massa estel·lar M i la lluminositat: $L \propto M^{3.5}$.

Estrelles pròximes similars al Sol són: la α -Centauri A (també G2V); la τ -Ceti (G8V): és una mica més freda, però encara és una G; i la 82-Eridani (és una G5V).

El Sol

El Sol (massa: 1.99×10^{30} kg, radi: 6.96×10^5 km), està compost per diverses capes diferents, cadascuna amb les seves pròpies característiques i propietats.

Les capes més importants o conegudes del Sol són les representades a la fig. seg.



- Nucli: És la zona més interna i calenta del Sol, on té lloc la fusió nuclear.

En el nucli solar, les temperatures i les pressions són tan extremes que 4 protons (nuclis de l'àtom d'hidrogen) es fusionen per a formar un nucli d'heli, ${}^4\text{He}$, a través de reaccions nuclears —el cicle del protó-protó. En cada cicle es perd un 0.7% de massa, que es converteix en energia segons l'equació d'Einstein $E = mc^2$. Aquesta energia és, bàsicament, fotons de raigs γ molt energètics i, per tant, de longitud d'ona molt-molt curta.

–Absorció: Els fotons γ generats no poden viatjar lliurement a través del plasma dens. Són constantment absorbits pels ions presents en el nucli. Quan un fotó γ és absorbit per un ió (que pot ser un protó, un nucli d'heli, o altres ions presents), aquest ió guanya energia.

–Re-emissió: Després d'absorbir el fotó γ , el ió excitat pot tornar a emetre energia en forma de nous fotons, però aquests fotons re-emesos solen tenir menys energia que l'original γ . Això es deu a que part de l'energia es dissipa en altres formes, com energia cinètica dels ions, escalfant el plasma.

Aquest procés d'absorció i re-emissió es repeteix innumbrables vegades mentre els fotons intenten sortir del nucli. Això es coneix com a difusió de fotons, i és un procés molt lent degut a l'alta densitat del plasma. A cada interacció, els fotons són absorbits i re-emesos amb menys energia. Per tant, els fotons γ inicials es converteixen gradualment en fotons amb energies més baixes (raigs X, ultraviolats, llum visible).

En el nucli predomina l'heli a l'hidrogen (protons) amb petites quantitats d'oxigen i carboni. Les condicions típiques en el nucli són:

$$P = 2.3 \times 10^{16} \text{ Pa}, \rho = 150 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, T = 15 \times 10^6 \text{ K}$$

- Zona radiativa. Va des del final del nucli fins al 70% del radi del Sol.

És la zona on la calor es transfereix, principalment, per radiació. Això vol dir que l'energia es mou a través del plasma mitjançant l'absorció i reemissió contínua de fotons.

A l'interior de la zona radiativa, unes condicions típiques poden ser:

$$P = 10^{12} \text{ — } 10^{14} \text{ Pa, } \rho = 0.2 \times 10^3 \text{ i } 20 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, T = 7 \times 10^6 \text{ K,}$$

- Zona convectiva: per sobre de la zona radiativa es troba la zona convectiva, on l'energia generada a la zona radiativa es transporta a l'exterior mitjançant corrents de convecció: el plasma fred baixa (i s'escalfa) i el calent puja (i es refreda), en un cicle continu.

Condicions típiques:

$$P = 10^7 \text{ — } 10^{11} \text{ Pa, } \rho = 0.2 \times 10^3 \text{ - } 0.002 \times 10^3 \text{ kg/m}^3, T = 2 \times 10^6 \text{ K}$$

Tant a les zones radiativa com a la convectiva com a l'atmosfera solar domina majoritàriament l'hidrogen, com a protons, amb l'heli —entre un 9% i un 25%—, i de l'ordre del 1% entre oxigen i carboni, i traces de molts altres elements.

Com per a totes les estrelles similars, més enllà de la zona convectiva tenim l'“atmosfera”, és a dir, la regió exterior del Sol, per sobre del seu interior dens i opac, on la densitat del plasma ja és prou baixa perquè els fotons puguin escapar cap a l'espai exterior. Es tracta de la part visible del Sol des de la Terra i és on es generen la major part de fenòmens i emissions que podem observar directament al Sol.

L'atmosfera solar es divideix en tres capes, cada una amb característiques físiques pròpies: la fotosfera, la cromosfera i la corona solar.

La fotosfera

La fotosfera és la capa interna de l'atmosfera del Sol, composta del 91% d'hidrogen i 8.9% d'heli i 0.1% d'altres elements. És la part del Sol que podem veure directament des de la Terra quan observem l'estrella. La fotosfera és una capa molt prima en comparació al radi del Sol, d'uns 500 km.

Per sota, la fotosfera es fon progressivament amb la zona convectiva, que és la capa de material solar més profund que està en constant moviment convectiu. Aquesta zona convectiva és menys transparent a la llum que la fotosfera i és on es generen els fenòmens de granulació que es poden observar a la superfície solar.

A la fotosfera, les temperatures solen estar al voltant dels 5500 a 6000 K. Aquesta temperatura és prou alta perquè els àtoms es trobin ionitzats i emetin una intensa llum visible. La pressió sol anar de menys d'1 atm fins a bastant més petita i la densitat entre 0.1 fins a 10^{-4} kg/m³.

La fotosfera és la part del Sol on es genera la llum visible que percebem. Aquesta llum es produeix a través del procés de radiació de cos negre a 5777 K, on la matèria calenta de la fotosfera emet una àmplia gamma de radiació electromagnètica, dominant la regió de la llum visible, 400 - 700 nm (lleï de desplaçament de Wien).

La fotosfera és una regió molt activa, plena de fenòmens com taques solars, granulacions, protuberàncies i altres formacions superficials.

- Les “taques solars” són àrees relativament fosques de la fotosfera que estan associades amb camps magnètics forts, i apareixen i desapareixen a mesura que el camp magnètic solar experimenta canvis —fig. pàg. seg.

- La “granulació” es refereix a les petites cèl·lules convectives d’uns 1000 km de gruix i d’uns 10 minuts de vida que es poden observar en la superfície del Sol, apareixent i desapareixent, produïdes pel moviment de la matèria calenta que emergeix de l’interior solar.
- Les “protuberàncies” són enormes fluxus de plasma solar molt lluminós que parteixen de la fotosfera i s’extenen per la corona allunyant-se milers de quilòmetres a conseqüència de les forces del camp magnètic del Sol —fig. anterior. Les protuberàncies es poden formar en només un dia però poden arribar persistir setmanes.

Filtres per a l’observació solar

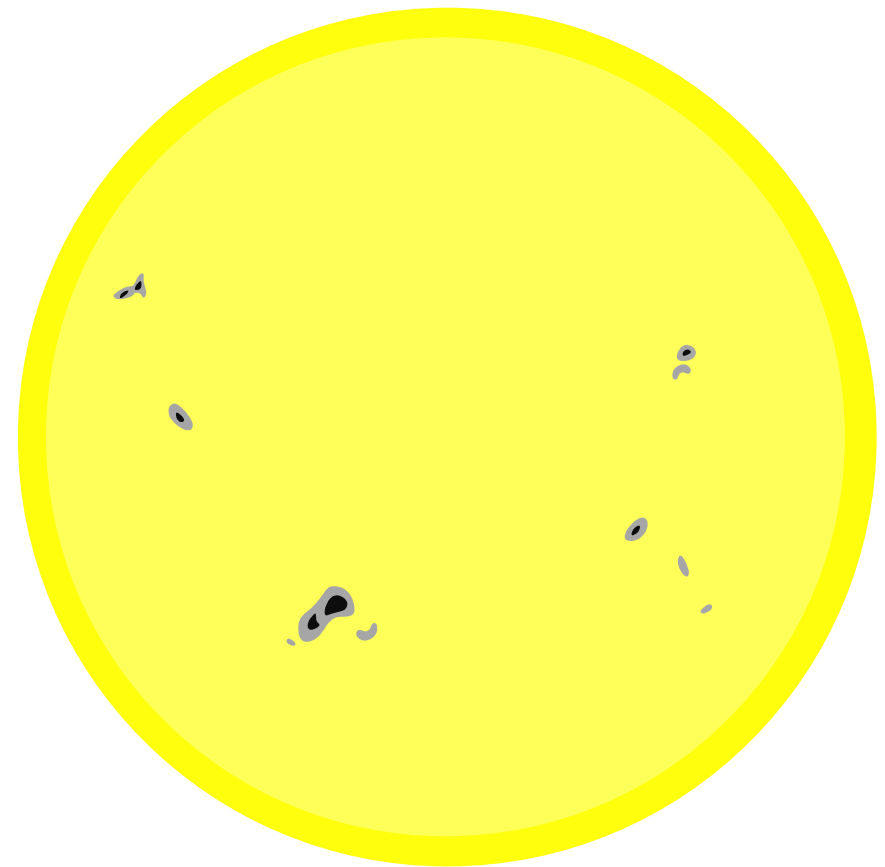
- Per a veure amb el telescopi les taques solars n’hi ha prou amb un filtre neutre, però per a veure les prominències, granulacions, flamarades o detalls de la cromosfera millor amb el filtre vermellós $H-\alpha$, de 656.3 nm.
- El filtre Ca II K (línia K del calci ionitzat), de 393.4 nm, en l’ultraviolat pròxim de l’espectre, més per a fotografia i anàlisi que per a l’observació visual directa. Permet l’observació de la cromosfera solar i destaca les regions actives, les facules i altres característiques associades amb l’activitat magnètica del Sol.

Observant diàriament les taques es pot comprovar que el Sol té una rotació diferencial: l’equador fa una volta en 24^d11^h i, p.ex., a 26° de latitud, en 25^d09^h , i que la inclinació de l’equador respecte de l’eclíptica és de 7.3° .

Imatge típica del Sol vista amb un filtre neutre, en “temporada alta”, amb moltes taques, en les quals es distingeix la penombra o zona gris i l’ombra o zona negra, més freda, a uns 3800 K, que es veu negra per contrast amb els 5500 K dels voltants.

Les taques solars són causades per intensos camps magnètics que emergeixen a través de la superfície del Sol. Aquests camps magnètics inhibeixen el transport convectiu de calor des de l’interior del Sol cap a la seva superfície, fent que les taques siguin més fredes i, per tant, apareguin més fosques. Les taques poden fer pocs o molts milers de quilòmetres i poden durar des de pocs dies a mesos.

Com comentarem després, el nombre i extensió de les taques així com de les protuberàncies i altres fenòmens superficials del Sol segueix un cicle de màxima i mínima activitat de 11 anys.



La cromosfera

A la fotosfera la temperatura va decreixent una mica amb l'altura, però a uns 500 km la temperatura es fa mínima perquè a partir d'aquí comença a créixer amb l'altura. Aquest mínim de temperatura marca el final de la fotosfera i l'inici de la cromoesfera, una nova capa molt poc densa d'uns 2 o 3000 km, amb una temperatura que comença amb 4000 K i arriba fins als 60000 K. La brillantor de la cromosfera és molt més dèbil que la de la fotosfera i només es pot observar breument durant un eclipsi solar total o bé amb el filtre $H\alpha$ esmentat abans.

La corona solar

La corona solar és la capa més externa i calenta de l'atmosfera del Sol, situada més enllà de la cromosfera. És una regió extremadament àmplia, s'estén des de la superfície del Sol fins a dos o tres radis solars. La corona solar és una regió d'interès especial per diverses raons:

- Temperatura: Malgrat que la temperatura a la superfície del Sol és d'uns 5700 K, la temperatura de la corona solar a només uns 2000 km per sobre de la fotosfera ja és entre 1 i 2×10^6 K.

Se sap que aquesta estructura de temperatures a l'atmosfera solar depèn molt del camp magnètic del Sol i que la corona està tan calenta per les ones de xoc que li arriben. Però aquesta és encara una àrea activa de recerca en astrofísica, i la comprensió completa dels mecanismes darrere d'aquest escalfament encara no es comprèn bé del tot.

La corona solar és visible durant els eclipsis totals de sol, quan la llum de la fotosfera queda eclipsada per la lluna i permet observar la corona que s'estén des de la superfície del Sol. Estudiar la corona solar és fonamental per comprendre la física de l'astrofísica solar i per comprendre com el Sol influeix en el sistema solar i en el nostre propi planeta.

L'atmosfera solar és una regió d'activitat intensa, on es produeixen diversos fenòmens.

- Vent solar: La corona solar és la font del vent solar, un flux constant de partícules carregades que s'emeten de la corona i s'estenen a través de l'espai, influenciant diversos fenòmens a tot el sistema solar, incloent-hi els fenòmens atmosfèrics de la Terra i l'interacció amb els cossos celestes.

La pèrdua de massa per vent solar és d'uns 10^9 kg/s.

- Les fulguracions (*flare solar*) són explosions violentes i sobtades d'energia i matèria de l'atmosfera solar que es produeixen de manera repentina i poden durar des de minuts fins a hores. Aquesta energia es manifesta en forma de llum visible, ultraviolada i raigs X. Les fulguracions poden accelerar electrons, protons (i ions pesants) a velocitats properes a la de la llum.

Es produeixen a les regions actives del Sol, particularment a prop de les taques solars, on els camps magnètics són més intensos i complexos.

Quan una fulguració solar està associada amb una ejecció de massa coronal (CME, de *coronal mass ejection*), desencadena una tempesta geomagnètica a la Terra, que com veurem, pot tenir greus conseqüències.

Les fulguracions, segons la seva intensitat en raigs X, es classifiquen de la A (les més febles), B, C, M i X (les més intenses). I dintre de cada lletra: de la 1 a la 9 (més intensa).

Aquí podem veure un exemple de fulguració en diversos filtres UV:

[Enllaç](#)

- Les prominències, per altra banda, són grans arcs de gas solar que es projecten des de la superfície del Sol cap a l'espai, mantenint-se aïllats per la força del camp magnètic solar.

El vent solar i les CME que arriben a la Terra són la causa de les aurores polars.

2. El camp magnètic del Sol



El Sol té un camp magnètic generat per moviments de convecció i rotació a l'interior solar. Aquest moviment de matèria carregada (plasma) genera corrents elèctrics, que, a la seva vegada, produeixen un camp magnètic a través del fenomen de la dinamo magnètica (conversió de l'energia cinètica del moviment del plasma en energia magnètica). Aquest dinamo es produeix en la zona de transició entre la zona radiativa i la zona convectiva,

El camp magnètic solar global es semblant al d'un dipol magnètic, amb un camp més fort als pols que a l'equador. Tanmateix, aquest camp és molt dinàmic i canvia significativament durant el cicle solar d'aproximadament 11 anys.

La intensitat del camp magnètic solar varia en funció de la regió del Sol que estiguem considerant i de diversos factors cíclics, com l'activitat solar.

- A la superfície solar, la intensitat del camp magnètic* és, aprox., de 0.1 a 0.3 mT.
- A la penombra de les taques solars és d'uns 150 mT, i a l'ombra, d'uns 300 mT

A més, el Sol té un camp magnètic global que varia en intensitat i direcció al llarg del temps en un cicle d'uns 11 anys, conegut com el cicle de l'activitat solar.

*Recordem: unitat del camp magnètic (B), en el SI: el Tesla, T. S'usen molts aquests dos submúltiples:

a) mT=mili-Tesla: $1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$; b) nT=nano-Tesla: $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$. Per exemple:

-Un imant típic simple de nevera (ceràmic o ferrita) pot crear molt a prop de la superfície de 10 mT.

-Un imant típic petit fort de neodimi, a la seva superfície: 100 mT=0.1 T.

-A la superfície de la Terra, el camp magnètic terrestre és al voltant de 0.04 mT=40000 nT.

-A l'espai interplanetari, de l'ordre de 1 nT.

El cicle solar de 11 anys

El cicle solar de 11 anys, també conegut com el cicle d'activitat solar o cicle de Schwabe*, és un fenomen observat en l'activitat del Sol en el qual la quantitat de taques solars i altres fenòmens relacionats amb el camp magnètic solar varia amb el temps amb un període d'aproximadament 11 anys.

- En els màxims d'aquest cicle, l'activitat solar és més gran, amb un nombre major de taques solars —més concentrades cap a l'equador— i d'altres fenòmens relacionats amb el camp magnètic solar.
- En els mínims del cicle, l'activitat solar és més baixa i el camp magnètic global del Sol és més feble.

Aquest cicle és el resultat de la dinàmica complexa de la dinamo magnètica del Sol, que és el mecanisme responsable de la generació i manteniment del camp magnètic del Sol. La dinamo magnètica del Sol es produeix a causa del moviment de convecció i rotació a l'interior solar, especialment a la zona convectiva propera a la superfície.

Durant el cicle solar, el camp magnètic del Sol experimenta una inversió de polaritat, és a dir, el pol nord magnètic del Sol esdevé el pol sud i viceversa.

Aquesta inversió de polaritat té lloc aproximadament cada 11 anys i coincideix amb els màxims d'activitat solar, quan el nombre de taques solars i altres fenòmens relacionats amb el camp magnètic solar és més gran.

El cicle solar de 11 anys està influït per diversos factors, incloent-hi la rotació diferencial del Sol esmentada abans, les interaccions del camp magnètic amb el plasma solar, i altres fenòmens dinàmics a l'interior solar.

El vent solar i les ejeccions de massa coronal (CME)

El vent solar és un flux constant de partícules carregades, principalment protons i electrons, que s'emeten de la corona solar, la capa més externa i calenta de l'atmosfera del Sol.

Aquestes partícules —en forma de plasma— es desplacen a través de l'espai a velocitats que, a 1 AU de distància, són de l'ordre dels 450 km/s, i tarden entre 3 i 5 dies en arribar a la Terra. Poden tenir un impacte significatiu en la Terra i en els altres planetes i cossos del sistema solar.

L'estructura de la corona solar està força determinada pel camp magnètic. Hi ha zones de la corona, els anomenats forats coronals, en els quals el camp magnètic s'estira més enllà i per on poden sortir fluxus de partícules carregades cap a l'espai interplanetari. El mecanisme físic exacte que expulsa les partícules generant el vent solar encara és un tema actiu de recerca en la física solar.

El vent solar és important, però de cara al “clima espacial” són molt més importants les ejeccions de massa coronal (CME). Una CME és un núvol de partícules amb un fort camp magnètic solar que és expulsat del Sol per causa d'una gran flamarada o erupció solar. És com un vent solar però molt més dens i ràpid que el vent solar habitual i dirigit en una direcció determinada, la gran majoria d'ocasion no cap a la Terra.

El camp magnètic dins del núvol de la CME també és molt més fort. Si a la distància terrestre (1 UA) l'extensió del camp magnètic solar, el camp magnètic interplanetari, té, habitualment, un mòdul d'uns 6 nT, en l'interior d'una CME aquest valor pot multiplicar-se per 7 o més.

Quan una CME arriba a la Terra es presenta una gran activitat a nivell d'aurores i es poden arribar a veure, fins i tot, a latituds molt més baixes de l'habitual. Però, també pot donar-se una tempesta geomagnètica, amb els problemes que, com veurem, comporta.

Missions espacials que mesuren l'activitat solar

- Ulysses, 1990, ESA-NASA: Estudiar l'heliòsfera solar, els pols solars i el vent solar.
- Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), 1995, ESA-NASA: Estudiar la corona solar, el vent solar i les erupcions solars.
- Hinode (Solar-B), 2006, JAXA-NASA: Estudiar el camp magnètic i les erupcions solars.
- Solar Dynamics Observatory (SDO), 2010: Investigar com l'activitat solar afecta la Terra i l'entorn espacial. Mesurar el camp magnètic solar, la radiació UV i les erupcions solars.
- Solar Orbiter, 2020, ESA-NASA: Estudiar les regions polars del Sol i comprendre com el camp magnètic solar genera el vent solar.
- Parker Solar Probe, 2018, NASA: Acostar-se al Sol més que qualsevol altra sonda anterior (6.1 Mkm). Recopilar dades sobre els mecanismes que escalfen la corona solar i acceleren el vent solar.
- STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory), 2006, NASA: Estudiar el Sol i els fenòmens relacionats amb el clima espacial, especialment les CME.

Són dues sondes: STEREO-A (Ahead=davant de la Terra) i STEREO-B (Behind=darrera la Terra), que orbiten al voltant del Sol en trajectòries diferents per proporcionar una visió estereoscòpica de l'activitat solar.

Podem seguir Stereo en directe: [Enllaç](#)

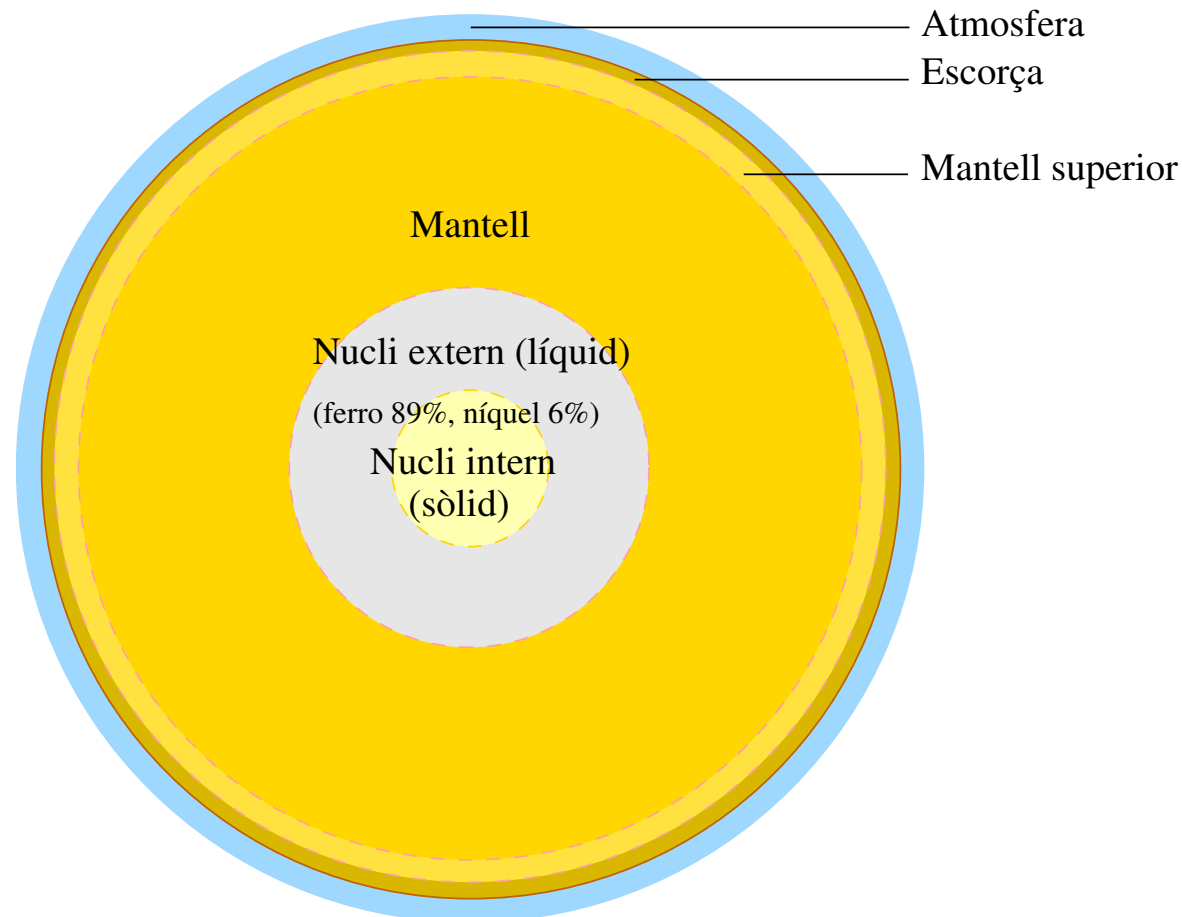
Més endavant també parlarem de les missions ACE (1997) i DSCOVR (2016), que estan al punt de Lagrange L_1 per estudiar el vent solar una estona abans de que arribi a la Terra.

3. La Terra



La Terra (massa: 5.97×10^{24} kg, radi: 6.37×10^3 km) és un planeta del Sol que l'orbita a una distància mitjana de 150×10^6 km.

Té una estructura interna complexa que es pot dividir en diverses capes distintes, cadascuna amb propietats úniques. Les principals capes de l'estructura interna de la Terra són les representades a la fig. seg.



- Escorça: L'escorça és la capa més externa i més prima de la Terra.

Es compon, principalment, d'oxigen, silici, i en menor quantitat alumini, ferro, etc. en forma de roques silícies, com granit als continents i basalt als oceans.

L'escorça és molt prima, amb un gruix mitjà d'uns 30 a 50 km sota els continents i d'uns 5 a 10 km sota els oceans.

- Mantell: El mantell és una capa molt més gruixuda que l'escorça i es troba just sota d'aquesta.

Es compon bàsicament d'un 45% d'oxigen, un 44% repartit a parts iguals entre magnesi i silici, un 6% de ferro, etc. És significativament més calent i flexible que l'escorça superior. El mantell es divideix en dues capes: el mantell superior i el mantell inferior, amb diferències en les seves propietats i composició.

- Nucli: El nucli és la capa més interna de la Terra i està compost principalment per un 89% de ferro, un 6% de níquel, 4% de sofre i traces d'altres elements.

Es divideix en dues regions principals:

-El nucli extern, que es troba directament sota el mantell, és líquid. És el responsable de la generació del camp magnètic de la Terra.

L'existència del nucli extern líquid es coneix des de principis del segle XX en comprovar que les ones sísmiques del tipus S (transversals) no es propagaven més en arribar al líquid del nucli extern.

-El nucli intern, que és sòlid i és una esfera més densa i compacta.

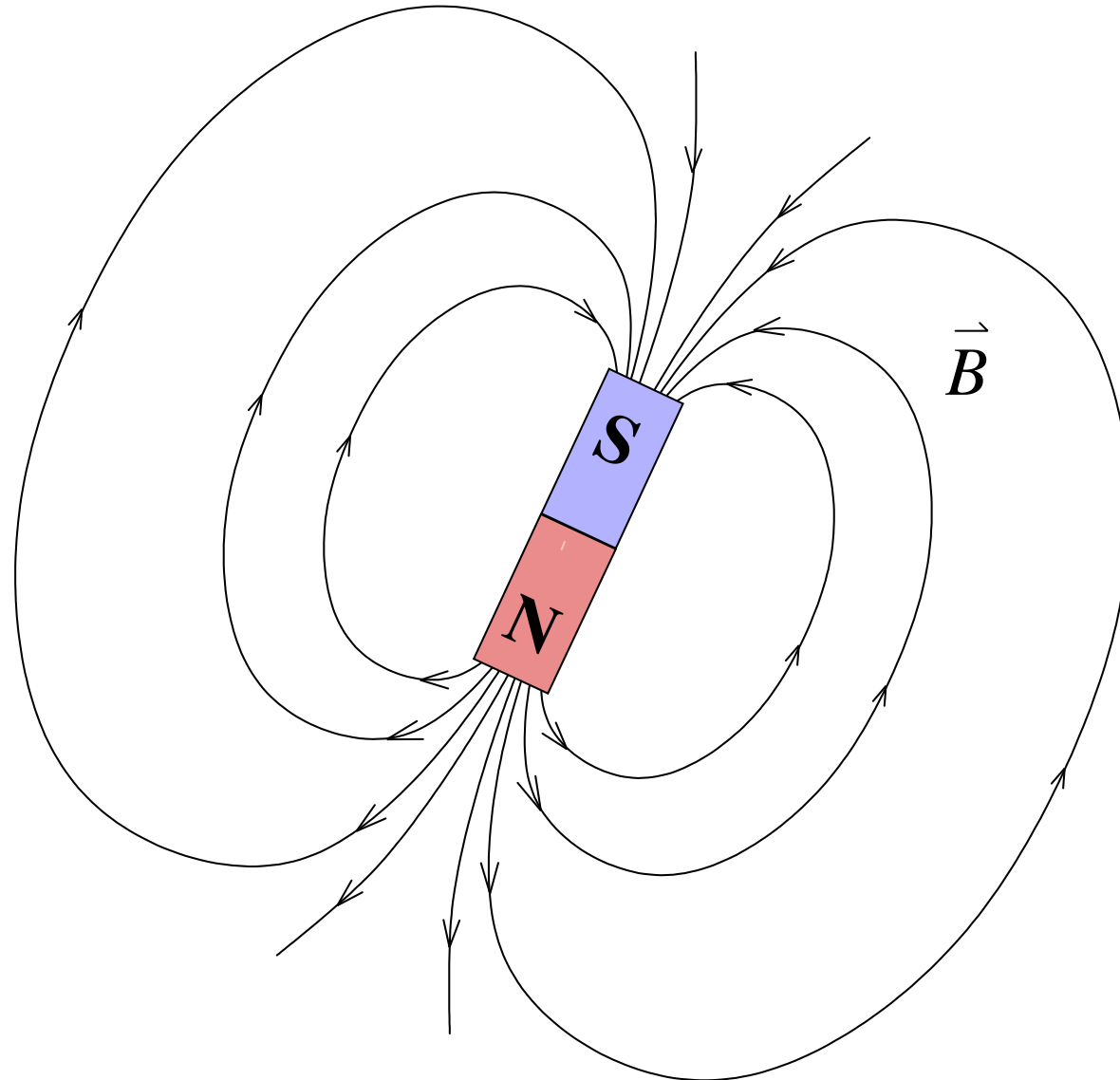
Aquestes capes de l'estructura interna de la Terra es caracteritzen per una varietat de processos geològics i dinàmiques, com ara l'activitat tectònica a l'escorça, la convecció del mantell que impulsa la deriva continental i altres moviments de plaques tectòniques, i els corrents de convecció de ferro líquid al nucli que generen el camp magnètic terrestre.

Com es genera i com és el camp magnètic de la Terra?

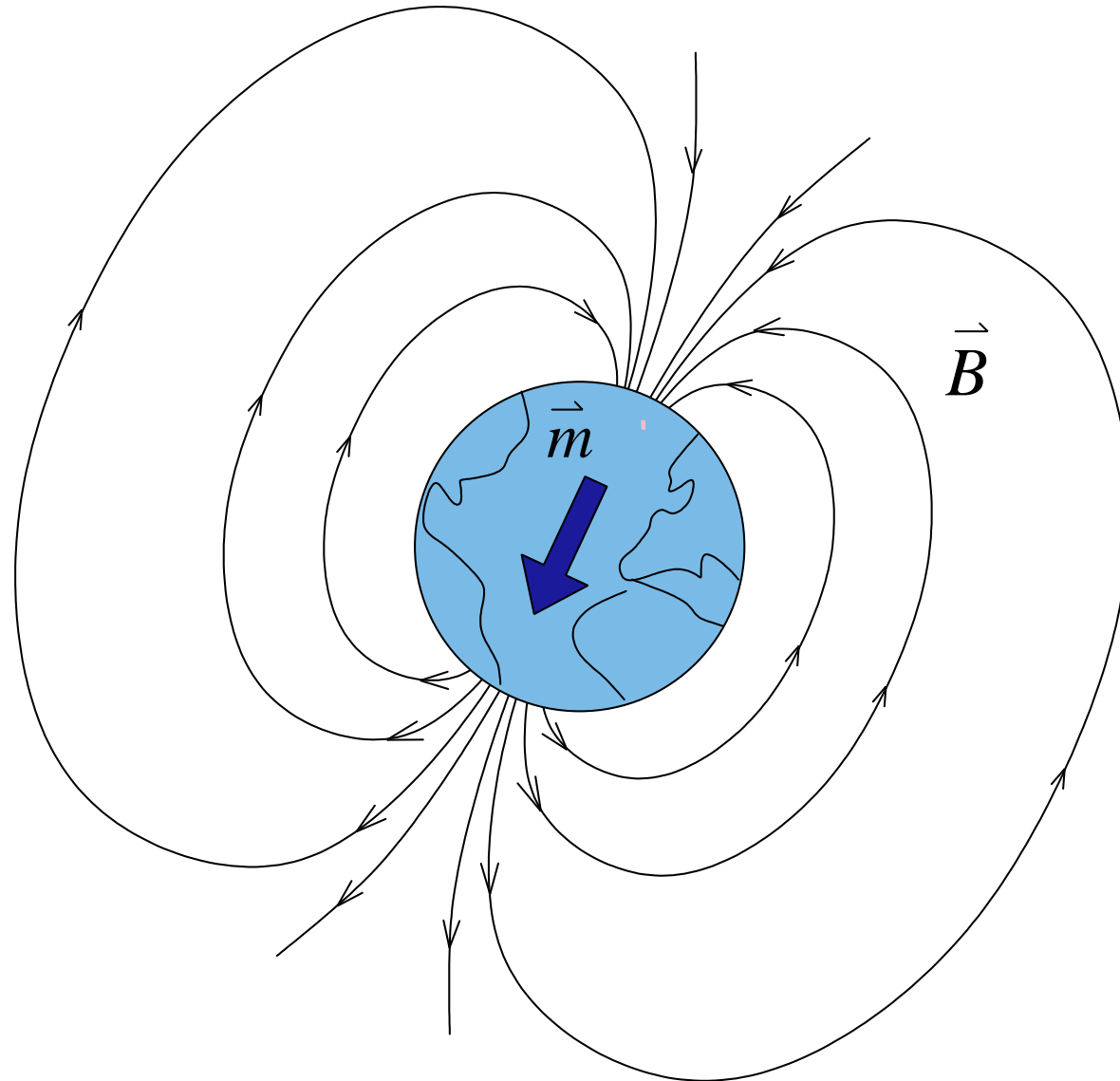
Es podria resumir així:

- **Convecció de ferro líquid:** Al nucli extern de la Terra, la temperatura és prou elevada per fondre part del ferro, creant un nucli extern líquid. Aquest ferro líquid té la capacitat de moure's de manera lliure a causa de les altes temperatures i pressions.
- **Corrents de convecció:** A mesura que el ferro líquid es mou a causa de les diferències de temperatura i pressió al nucli extern, es generen corrents de convecció. Aquests corrents de convecció actuen com grans corrents elèctrics en el ferro líquid.
- **Dinamo geomagnètica:** Els corrents de convecció del ferro líquid actuen com una dinamo natural, generant un camp magnètic mitjançant el procés de inducció electromagnètica. Aquest fenomen és similar al que es produeix en una dinamo elèctrica, on el moviment relatiu entre el conductor elèctric i un camp magnètic crea corrents elèctrics.
- **Camp magnètic terrestre:** Els corrents de convecció del ferro líquid generen un camp magnètic que s'estén des del nucli fins a l'espai exterior al voltant de la Terra. Aquest camp té una forma aproximada al creat per un dipol magnètic (com un imant de barra, amb els pols magnètics nord i sud separats) —vegeu les dues figs. pàgs. segs.

Camp magnètic creat per un dipol (imant de barra). El camp és tangent a les línies de camp.
Allà on les línies de camp estan més juntes —a prop dels pols— el camp és més intens, i on estan més separades, el camp és més fluixet.



El camp magnètic creat per la Terra és semblant al creat per un dipol.
A prop del pol nord les línies van del nord cap al sud (cap a dintre); però, lluny del pol nord, el camp va del sud cap al nord.



Curiositats sobre el camp magnètic terrestre:

El moment dipolar magnètic \vec{m} és una mesura de la intensitat del camp magnètic creat per un dipol.

- Per a la Terra de l'ordre de^(a) $8 \times 10^{22} \text{ A}\cdot\text{m}^2$,
- Inclinat uns 11° respecte de l'eix de rotació: actualment, el Pol “Nord” Magnètic (PNM)^(b) està a un 1600 km del Pol Nord Geogràfic (pel nord de Canadà).
- El camp magnètic \vec{B} a la superfície de la Terra varia entre 0.025 i 0.065 mT, depenent de la ubicació geogràfica i factors locals.
- Els Pols magnètics de la Terra són els punts on les línies de camp magnètic terrestre són perpendiculars a la superfície (cap a fora la nord magnètic, cap a dintre al sud magnètic). Com més a prop dels pols magnètics, la brújula es torna més insegura.
- El PNM es desplaça^(c) a uns 40 km/any (el Sud no es mou tant):
 - Al 2020, el Pol “Nord” Magnètic (WMM) estava a 86.5°N , 162.9°E ,
mentre que el Pol “Sud” a 64.1°S , 135.9°E .
 - Al 1990, el Pol “Nord” Magnètic (WMM) estava a 78.1°N , 103.7°E ,
mentre que el Pol “Sud” a 64.9°S , 138.9°E .

^(a)Per a generar aquest moment dipolar caldria 626×10^6 de fils conductors que donessin la volta a l'equador portant tots ells 1 A de corrent.

^(b)Realment, a prop del Pol Nord geogràfic (Canadà) el que hi ha és pol sud magnètic, i a l'inrevés.

^(c)Al llarg dels temps geològics, la polaritat del camp magnètic de la Terra ha anat canviant. L'últim canvi va ser fa 780000 anys. Durant l'època de la inversió (milers d'anys) poden sorgir múltiples pols magnètics disminuïts.

Què és la magnetoesfera i la magnetopausa d'un planeta?

- La magnetosfera és una regió de l'espai al voltant d'un planeta en la qual el seu camp magnètic domina la influència de l'entorn espacial, com ara el vent solar.

Aquesta regió es forma com a resultat de la interacció entre el camp magnètic del planeta i el vent solar, que està format per partícules carregades i camp magnètic del Sol.

La magnetosfera actua com un escut protector per al planeta i la seva atmosfera, desviant partícules carregades i radiació del vent solar, així com també protegint contra l'erosió atmosfèrica causada per aquesta radiació.

És una regió dinàmica i variable que s'estén des de la superfície del planeta fins a una distància considerable a l'espai.

- La magnetopausa, d'altra banda, és la frontera externa de la magnetosfera, on el camp magnètic del planeta es troba amb el vent solar.

És una regió de transició on el camp magnètic del planeta cedeix gradualment la seva influència al vent solar.

La magnetopausa és una zona d'interacció intensa entre el camp magnètic del planeta i el vent solar, i és un punt crític on es produeixen diversos fenòmens, com ara la reconexió magnètica i la transferència d'energia entre el vent solar i la magnetosfera.

Les aurores polars

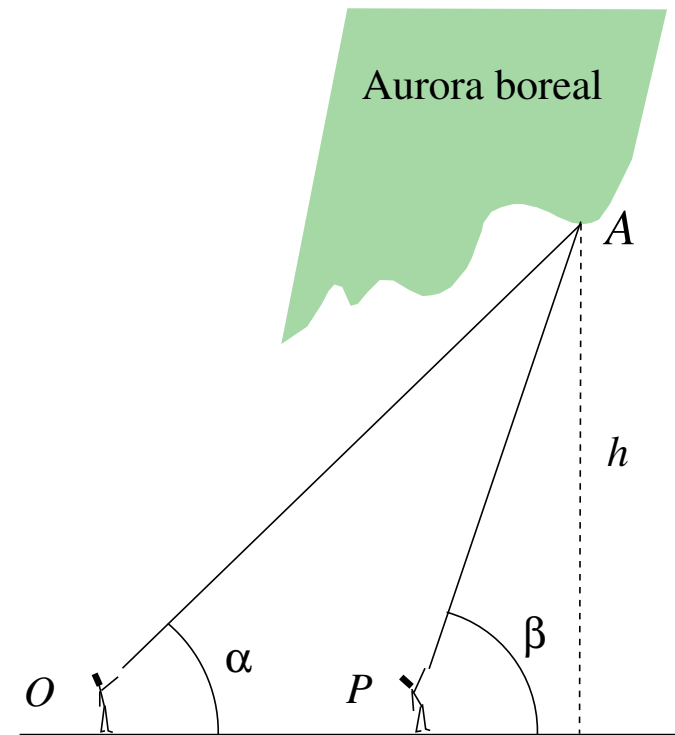
Les aurores polars són un fenomen visual conegut des de l'antiguetat. Sembla que va ser Galileo el que, al 1619, les va bateixar amb el nom d'“aurores”. Però el fenomen no es va començar a explicar fins a principis del segle XX per part del científic noruec Kristian Birkeland (1867-1917).

Les aurores polars —boreals o australs— són un fenomen visual atmosfèric que es produeix quan partícules carregades procedents del vent solar arriben a la magnetosfera de la Terra i en les capes altes de l'atmosfera impacten amb àtoms i molècules de gas, principalment oxigen i nitrogen.

Aquesta col·lisió entre les partícules carregades, bàsicament electrons i protons, i els gasos atmosfèrics produeix emissions de llum, que són el que percebem com a aurores boreals.

Els colors característics de les aurores, com el verd, el rosa, el blau i el violeta, com veurem més endavant, depenen del tipus d'àtom o molècula que està involucrada en la col·lisió, així com de l'altitud on es produeix la interacció.

Si dos observadors — O i P a la fig. adj.— observen simultàniament una característica particular A d'una aurora i mesuren els angles α , β i la seva distància OP poden deduir fàcilment l'altura h a la qual està A . Així és fàcil comprovar que la major part de la llum de les aurores ve d'altures a partir dels 100 km.



Per entendre millor aquest procés, podem descompondre'l en diversos passos.

- El vent solar o flux constant d'electrons i protons procedents del Sol que desplacen a gran velocitat pel sistema solar interactuant amb el camp magnètic de la Terra creant-se la magnetosfera. Aquesta actua com una barrera protectora que desvia moltes d'aquestes partícules carregades, però algunes d'elles acaben penetrant-la.
- Quan aquestes partícules carregades arriben a la magnetosfera terrestre són canalitzades pel camp magnètic de la Terra cap als pols magnètics, que són les zones on el camp magnètic és més intens.

Això és el que s'explica en les tres figs. de les tres pàgs. següents:

1a) Es mostren unes línies de camp magnètic en forma de tub que es van fent estret perquè les línies es junten. En les representacions gràfiques dels camps, la direcció del camp és la direcció de les línies i quan aquestes se junten significa que el camp és més intens.

En la pàg. següent es mostra (i es justifica) la trajectòria d'un electró del vent solar quan "entra" en el camp magnètic de la Terra: descriu una trajectòria helicoidal de radi i pas de rosca més petit a mesura que el camp es va fent més intens.

2a) Això és el que passa a un electró quan s'acosta a la Terra. En moltes ocasions, segons sigui el camp, hi ha un efecte mirall i l'electró torna endarrera i es queda oscil·lant al voltant de la Terra altres ocasions l'electró baixa prou com per a col·lisionar amb molècules o àtoms de l'atmosfera generant les aurores.

3a) En la tercera figura es mostra el camp magnètic real que envolta la Terra: superposició del camp magnètic intrínsec de la Terra i com el deforma el vent solar, sobre tot quan aquest és intens.

4. Moviment de les càrregues en el camp magnètic terrestre



Si una càrrega —p.ex., un electró e — entra amb una velocitat \vec{V} en el camp magnètic creixent \vec{B} experimenta la força magnètica de Lorentz (FM): $\vec{F} = q \vec{V} \times \vec{B}$

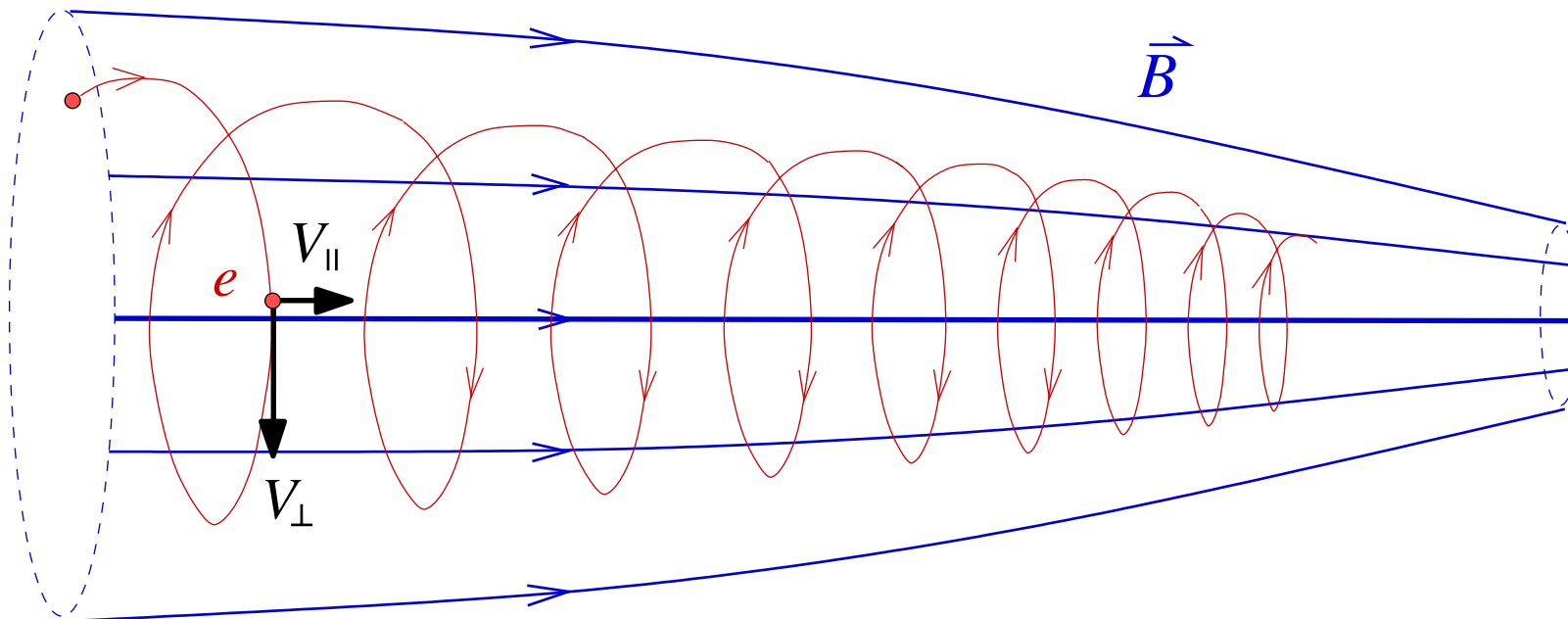
Si descoposem \vec{V} en la component perpendicular \perp a \vec{B} i la paral·lela \parallel : $\vec{V} = \vec{V}_\perp + \vec{V}_\parallel$

Llavors: $\vec{F} = q (\vec{V}_\perp + \vec{V}_\parallel) \times \vec{B} = q \vec{V}_\perp \times \vec{B}$

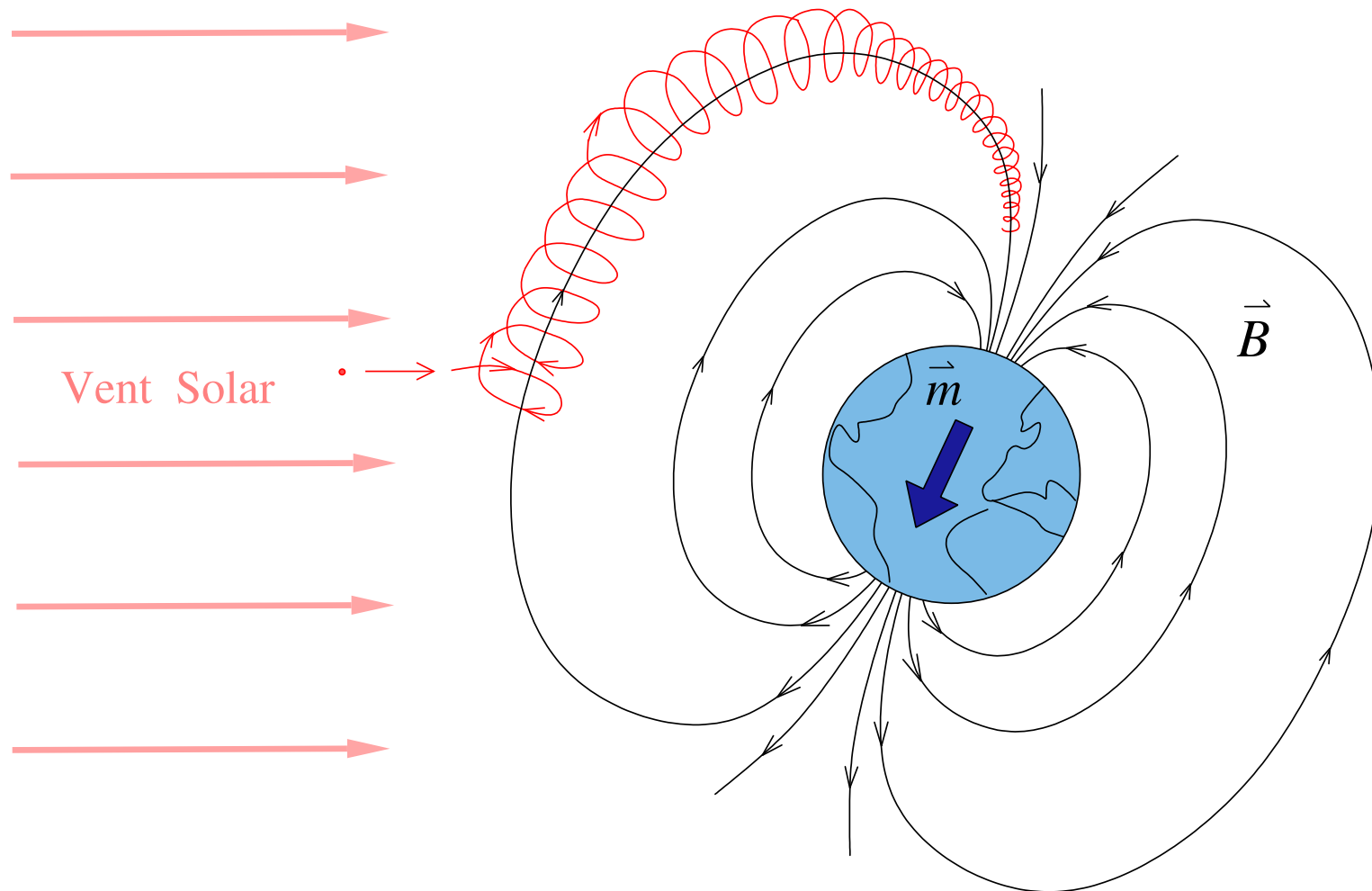
Conclusió: la FM no modifica els mòduls de \vec{V}_\perp i \vec{V}_\parallel , i com que la FM és normal a la \vec{V}_\perp fa de força centrípeta $F_c = m V^2/R$ i obliga a l'electró a fer una trajectòria helicoidal —vegeu la fig. seg.—, de radi de curvatura R i pas de rosca L donats per:

$$R = \frac{V_\perp}{\frac{q}{m} B}$$

$$L = \frac{2\pi V_\parallel}{\frac{q}{m} B}$$

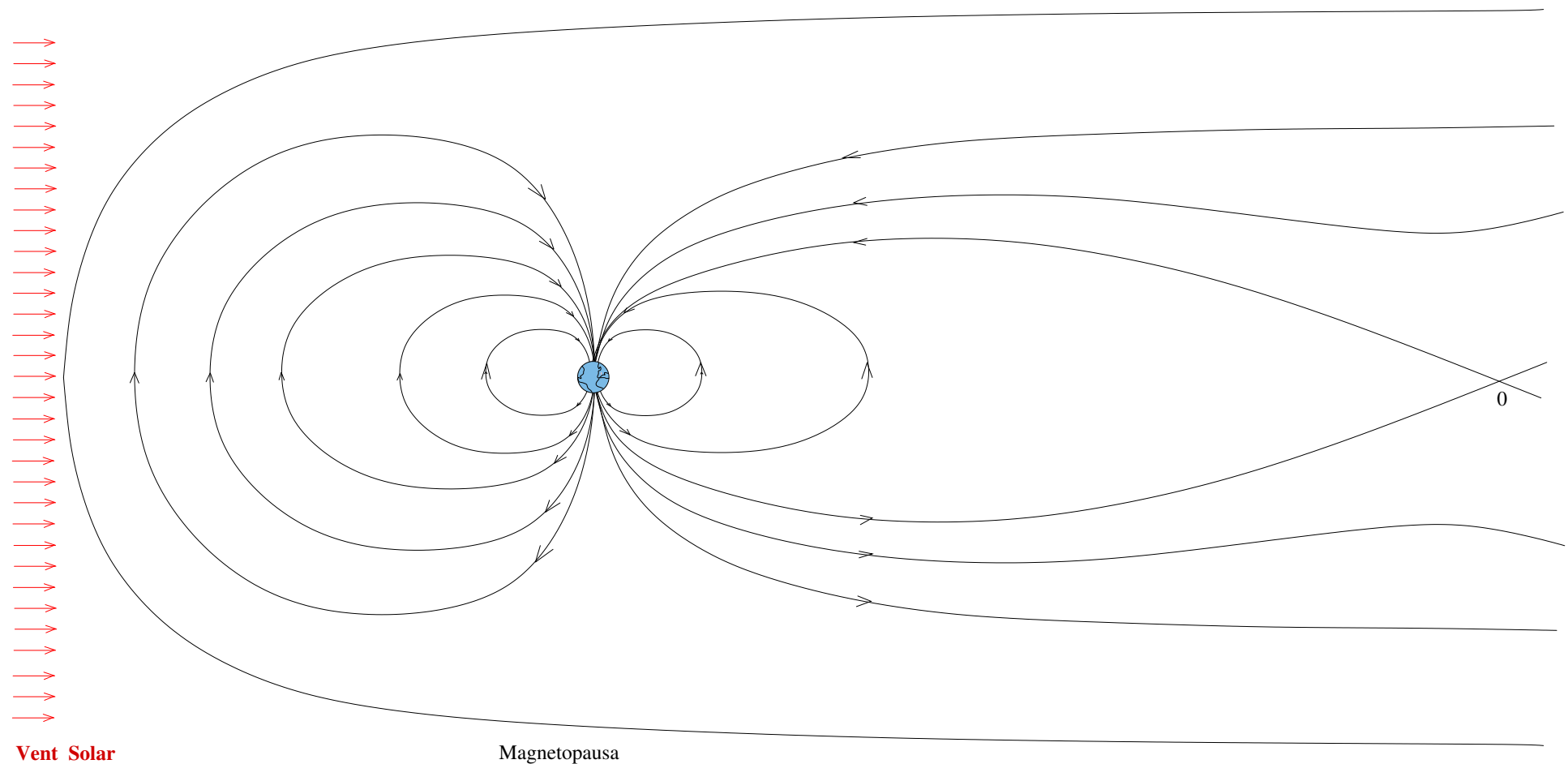


Si una partícula carregada s'acosta ràpidament a la Terra, també es trobarà, com en la pàg. anterior, amb un camp magnètic creixent i acabarà describint una trajectòria més o menys helicoidal seguint les línies del camp magnètic terrestre que van cap el pols magnètics —fig. seg. Dependent de les components de la seva velocitat la partícula quan s'acosti a la superfície retornarà endarrera o acabarà impactant contra les molècules de l'alta atmosfera. Les d'aquest segon cas són les que creen les aurores polars.



A la realitat, els electrons i protons del vent solar deformen molt el “simple” camp magnètic dipolar simètric de la Terra; tant és així que, realment, la magnetosfera està molt allargada en sentit contrari al Sol, sobre tot quan el vent solar és més quantiós.

A la fig. seg., es mostren les línies del camp magnètic real de la Terra i la magnetopausa. Aquesta és la frontera entre la magnetosfera i el vent solar i delimita l'àrea en la qual el camp magnètic terrestre domina i protegeix la superfície terrestre del vent solar.



- En arribar a l'atmosfera superior, aquestes partícules impacten amb les molècules molècules del gas atmosfèric. Durant aquesta interacció, algunes de les partícules carregades transmeten la seva energia als gasos, excitant els electrons de les molècules d'oxigen i nitrogen. Quan aquests electrons tornen al seu estat d'origen, emeten fotons de llum en diferents longituds d'ona, creant així els espectaculars jocs de llum que observem com a aurores boreals.

Imatge idealitzada de la vista d'una aurora boreal (creada per [dream.ai](#))



Els cinturons de Van Allen

S'anomena així a la part de la magnetosfera pròxima a la Terra, en forma toroidal al voltant de l'eix magnètic, plena d'electrons i protons energètics atrapats pel camp magnètic. Bàsicament, hi ha dos cinturons.

El cinturó intern s'estén, aprox., de 650 a 12000 km d'altitud sobre la superfície terrestre, mentre que el cinturó extern es troba a una altitud entre els 13000 a 60000 km.

En el cinturó interior predominen els electrons, mentre que els protons són més abundants al cinturó exterior. A més d'electrons i protons també hi ha un petit percentatge de nuclis d'heli i ions pesants.

Les partícules dels cinturons de Van Allen provenen principalment del vent solar, capturades pel camp magnètic de la Terra i dirigides cap als pols magnètics, on s'acumulen en els cinturons.

Van ser descoberts el 1958 a partir de les mesures del satèl·lit americà Explorer 1. Són importants en astronàutica per què poden causar problemes a satèl·lits en òrbites no baixes si no estan preparats, o en missions espacials tripulades quan els travessen.

Els cinturons de Van Allen no són estàtics; la seva intensitat i configuració poden canviar en resposta a l'activitat solar, com ara erupcions solars i tempestes geomagnètiques. Aquestes variacions poden dificultar la navegació, en les comunicacions de satèl·lits i, en casos extrems, poden requerir mesures de protecció addicionals per a les naus espacials i les missions tripulades que van més enllà dels 1000 km.

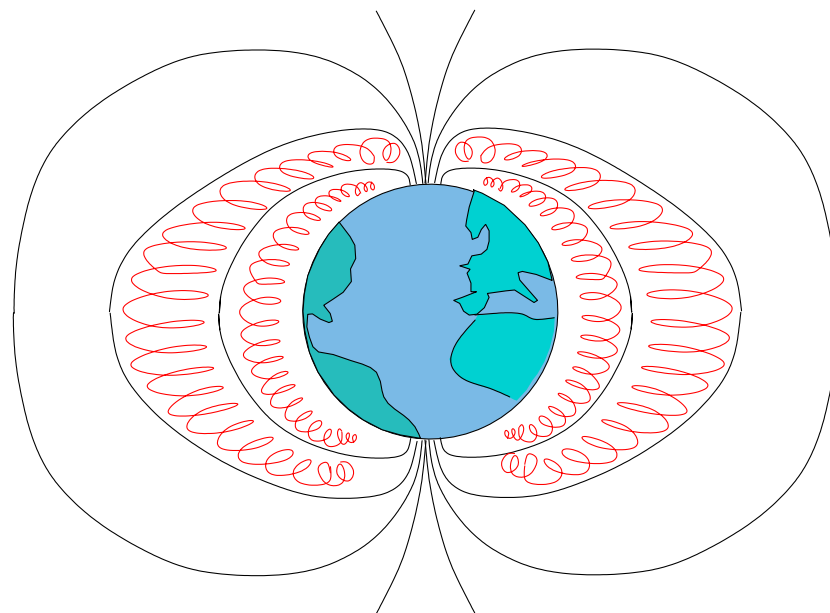
Com hem vist abans, les partícules carregades es mouen en trajectòries helicoidals al voltant de les línies del camp magnètic.

...

...

Quan les partícules s'apropen als pols magnètics, la intensitat del camp augmenta i algunes de les partícules experimenten una força reflectora que les fa canviar de sentit, movent-se cap ara cap a l'altre pol magnètic. Aquest fenomen s'anomena "efecte mirall" i és molt característic dels cinturons: càrregues que segueixen trajectòries helicoidals oscil·lant entre els pols magnètics nord i sud, sense arribar a tocar la Terra*. La fig. següent —no pretén estar a escala— intenta representar això.

A més de moure's en espiral i ser reflectides als pols, les partícules també deriven lateralment al voltant de la Terra. Els electrons deriven cap a l'est, mentre que els protons deriven cap a l'oest. Aquest moviment es deu a la combinació de la força de Lorentz i la curvatura de les línies del camp magnètic terrestre. Podeu llegir més sobre els cinturons [aquí](#).



*Aquest efecte de mirall magnètic també passa i s'usa en el plasma confinat que hi ha en els reactors de fusió nuclear tipus tokamak ([enllaç](#)).

5. Les aurores polars: llum i color



A prop dels pols magnètics, les línies del camp magnètic de la Terra es dirigeixen cap a l'atmosfera. Aquestes línies permeten que les partícules carregades del vent solar viatgin al llarg d'elles i entrin a l'atmosfera terrestre.

Pel fet de tenir molta menys massa i, per tant, són accelerades amb més facilitat pels camps magnètics, els electrons són les partícules molt majoritàries que entren a l'atmosfera i causen les aurores.

Durant esdeveniments solars com les ejeccions de massa coronal (CME) o les erupcions solars, la quantitat i velocitat d'aquestes partícules augmenten significativament i augmenta molt la possibilitat de que hi hagi aurores.

Els colors observats a les aurores polars estan relacionats amb les emissions de llum produïdes quan les partícules carregades del vent solar impacten amb els àtoms i molècules de l'atmosfera terrestre.

Els electrons i protons del vent solar que entren a l'atmosfera xoquen amb els àtoms i molècules de l'aire, transferint-los energia. Els electrons en els àtoms o molècules poden absorbir aquesta energia excitant-se a estats d'energia més alts.

Els electrons en estats excitats acaben tornant als seus estats d'energia més baixos (estat fonamental), alliberant l'energia absorbida en forma d'un fotó.

Aquesta emissió de fotons és el que veiem com a llum de les aurores, i el color de la llum depèn de la longitud d'ona de l'emissió de fotons.

El temps de vida de l'estat excitat és el període durant el qual un àtom roman en un estat energèticament excitat abans de retornar al seu estat fonamental, emetent l'energia en forma de fotó en el procés.

Els diferents colors en una aurora polar depèn de diversos factors però, especialment, de l'energia de les partícules carregades, la composició de gasos a l'atmosfera i la densitat d'aquesta, és a dir, l'altitud.

Influència de l'altitud en el temps de vida del nivell excitat

- Altituds baixes: A altures més baixes (per exemple, 90-150 km), la densitat de l'atmosfera és relativament alta, fet que augmenta la probabilitat de col·lisions entre partícules. Aquestes col·lisions poden provocar una desexcitació o relaxació no radiativa, reduint així el temps de vida del nivell excitat perquè les partícules es desexciten a través de col·lisions més ràpidament que per emissió de fotons.

És el cas del nitrogen molecular (N_2) i iònic (N_2^+), amb temps de vida de menys d'1 s.

- Altituds altes: A altures superiors als 300 km, la densitat de l'atmosfera és molt baixa, i les col·lisions entre partícules són menys freqüents. Això permet que les partícules tinguin un temps de vida més llarg en l'estat excitat, ja que la desexcitació es produeix principalment a través de l'emissió de fotons.

És el cas de l'oxigen atòmic (O) amb temps de vida de 110 s per l'emissió vermella a 630.0 nm.

Petita taula sobre els colors de les aurores polars, incloent el color, la longitud d'ona, el gas causant (molècula, àtom o ió), el temps de desexcitació, i l'altura aproximada on es produeixen.

Color aurora	Long. d'ona, λ	Gas	T. Desexc.	Altitud aprox.
Verd	557.7 nm	Oxigen atòmic (O)	0.7 s	100 - 300 km
Vermell	630.0 nm	Oxigen atòmic (O)	110 s	>300 km
Blau	427.8 nm	Nitrogen mol. (N ₂)	< 1 s	90 - 150 km
Violeta	391.4 nm	Nitrogen mol. (N ₂)	< 1 s	90 - 150 km
Vermell	658.4 nm	Nitrogen iònic (N ₂ ⁺)	< 1 s	90 - 150 km

També hi ha “aurores” polars fora de l'espectre visible. Per ex.:

-L'hidroxil (OH) és el gas més important en l'emissió en l'IR (entre 0.5 i 2.5 μm).

-L'hidrogen atòmic (H) és una font important d'emissions UV durant les aurores, en la línia Lyman- α de l'hidrogen (a 121.6 nm). En aquests cas els electrons incidents han de ser molt energètics.

Aquestes emissions, invisibles per a l'ull humà, són estudiades per satèl·lits i des de terra perquè proporcionen molta informació valuosa sobre els processos que ocorren en l'atmosfera superior durant les aurores.

A Europa —al nord d'Europa— una forma simple de saber si hi ha ara mateix aurores boreals consisteix en veure els valors que mesura el “magnetòmetre de Kiruna” (Kiruna és una ciutat al nord de Suècia, seu de l'Institut Suec de Física Espacial. Podeu llegir més [aquí](#)).

6. Les tempestes solars



Una tempesta solar es produeix quan hi ha una erupció significativa o una explosió a la superfície del Sol, com ara una fulguració o una ejecció de massa coronal (CME). Aquestes erupcions extraordinàries alliberen quantitats massives d'energia i partícules carregades cap a l'espai, una part de les quals, malgrat la protecció de la nostra magnetosfera, acabaran impactant sobre l'atmosfera terrestre creant una tempesta geomagnètica.

Els efectes d'una tempesta solar —i la consegüent tempesta geomagnètica— són diverses, des d'una activitat auroral augmentada fins, com veurem més endavant, a poder afectar les comunicacions, les xarxes elèctriques i els sistemes de navegació, entre altres sistemes tecnològics.

Es poden preveure les tempestes solars?

Els científics solars i les agències espacials monitoritzen de prop l'activitat solar i emeten alertes quan es preveuen erupcions significatives. Això permet als operadors de xarxes elèctriques, aeroespacial i altres infraestructures prendre mesures per protegir-se dels efectes d'aquestes tempestes solars.

Tot i que no es pot predir amb total certesa quan i com es produirà una erupció solar específica, hi ha diversos indicadors que poden donar als científics una idea de la probabilitat d'una activitat solar intensa.

- Observacions solars: Els observatoris espacials solars que hem vist abans, com els SOHO, SDO, el STEREO o el Parker monitoritzen contínuament l'activitat solar, incloent-hi les taques solars, les fulguracions i les CME. Les anomalies o canvis observats indiquen la possibilitat d'una erupció solar imminent.

...

- Camp magnètic solar: Les erupcions solars estan estretament relacionades amb la complexitat i la inestabilitat del camp magnètic del Sol. Les taques solars, que són regions on el camp magnètic emerge de la superfície solar, poden ser fonts de fulguracions i CME. Els científics estudien la configuració i l'evolució del camp magnètic solar per predir l'activitat solar futura.
- Heliosfera: Les observacions del vent solar i la magnetosfera terrestre poden proporcionar informació sobre la presència i l'activitat de les CME en camí cap a la Terra. Les xarxes d'observatoris espacials, com ara el “Sistema d'Alerta d'Incidències Espacials (Space Weather Prediction Center)” de la NOAA —*National Oceanic and Atmospheric Administration*, dels EUA— monitoritzen el vent solar, el camp magnètic interplanetari i altres paràmetres per a la detecció d'aquestes CME.

Els científics utilitzen models informàtics basats en dades observades per predir l'evolució de l'activitat solar i avaluar el risc de tempestes solars.

Aquests models tenen en compte diversos factors, com ara la configuració del camp magnètic solar, l'activitat en regions actives i altres variables solars.

Tot i que les prediccions de les tempestes solars han millorat en les últimes dècades, encara hi ha limitacions en la precisió de les prediccions i en la capacitat de predir amb antelació l'activitat solar específica.

No obstant això, el seguiment i la vigilància de l'activitat solar permeten als científics emetre alertes i avisos sobre el risc de tempestades solars i prendre mesures preventives per protegir infraestructures i sistemes afectats.

En el web *Space Weather Live* es pot seguir l'activitat solar i el clima espacial, en directe: [Enllaç](#)

Per a tenir una idea de com canvien alguns paràmetres durant una tempesta solar en comparació amb períodes de calma, tenim:

- Activitat de les taques solars: Durant períodes de baixa activitat solar, el nombre de taques solars és mínim. En canvi, durant períodes d'alta activitat solar, el nombre de taques augmenta significativament.
- Flux de raigs X solars: Durant una tempesta solar, es produeixen erupcions solars que emiten radiació en forma de raigs X.

Durant una tempesta solar moderada, el flux de raigs X pot augmentar diverses vegades el nivell base del Sol en l'espectre de raigs X, aconseguint valors de les menys diverses unitats a l'escala GOES (Sistema de Observación de Eventos Geofísicos).

Durant una tempesta solar més intensa, el flux de raigs X encara pot augmentar bastant més.

- Velocitat del vent solar: Durant períodes de calma solar, la velocitat del vent solar pot ser relativament constant i moderada, generalment al voltant de 300 a 400 km/s.
Però, durant una tempesta solar, la velocitat del vent solar pot augmentar significativament, assolint valors de més de 700 km/s o fins i tot superiors, depenent de la intensitat de la tempesta o durant esdeveniments solars intensos com les CME. Si una CME es dirigeix cap a la Terra quan les partícules carregades interactuin amb el camp magnètic terrestre causaran una tempesta geomagnètica.
- Densitat del vent solar: Durant una tempesta solar, la densitat del vent solar pot augmentar bastant.
 - En períodes de calma solar, la densitat del vent solar és típicament d'unes 5 a 10 partícules per cm^3 .
 - Durant una tempesta solar, la densitat del vent solar pot anar de 20 a 400 partícules per cm^3 .

El camp magnètic interplanetari (IMF) i la vulnerabilitat de la Terra

L'IMF (de *interplanetary magnetic field*) és l'extensió del camp magnètic solar en l'espai interplanetari, portat pel vent solar. A l'altura de la Terra té valors que van de 1 fins a 20 o més nT, 30 nT en cas de tempesta solar intensa.

Com que el Sol rota (període de 25 dies), el camp magnètic solar s'enrotlla en una espiral coneguda com l'espiral de Parker*. L'estructura espiral significa que les línies del camp magnètic no són rectes sinó corbades. Aquest camp magnètic és arrossegat pel vent solar i ompla tot l'espai interplanetari.

Quan el vent solar arriba a la Terra, el IMF interactua amb el camp magnètic terrestre. Aquesta interacció és especialment intensa durant les tempestes solars o les CME, causant tempestes geomagnètiques.

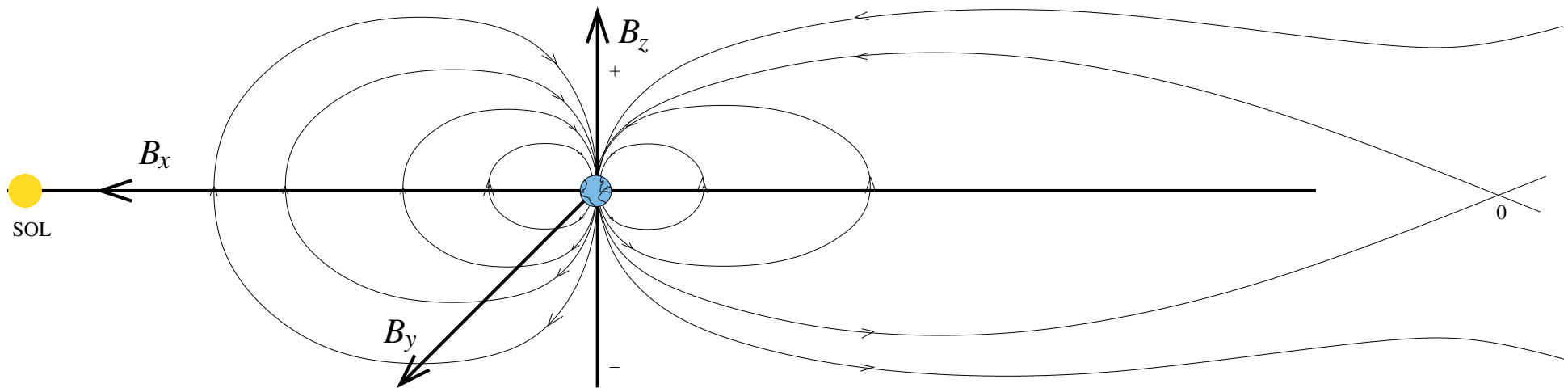
El vector IMF, \vec{B} , pot ser descompost en tres components —fig. pàg. següent—

- B_x : Component en direcció/sentit de la Terra cap al Sol.
- B_y : Component perpendicular a la línia Sol-Terra (a B_x), en el pla de l'eclíptica.
- B_z : Component perpendicular a l'eclíptica, Habitualment, se sol dir “en direcció nord-sud”.

En la pràctica, B_z és el component més important, i el seu sentit o signe, és fonamental:

- B_z Positiu (cap al nord): té, aprox., el mateix sentit que la part de la magnetosfera amb el camp magnètic cap el nord. En aquesta configuració, el IMF tendeix a reforçar el camp magnètic terrestre.
- B_z Negatiu (cap al sud): El component B_z del IMF té, aprox. el sentit oposat a la part de la magnetosfera amb el camp magnètic cap el nord. (Pensem en el que passa quan alineem dos imants de barra apropant els seus pols oposats). En aquesta configuració es debilita el camp magnètic i la Terra es torna més vulnerable a l'entrada de partícules càrregades i a les tempestes geomagnètiques.

Per a que es comenci a formar una tempesta geomagnètica és fonamental que la direcció z del IMF, B_z , giri cap al sud. Els valors continus de -10 nT i inferiors són bons indicadors que s'està desenvolupant una tempesta geomagnètica; com més negatiu sigui aquest valor, millor serà per a l'activitat auroral. Amb una B_z cap al nord (positiva) només es podria desenvolupar una tempesta geomagnètica (veurem que de Kp5 o superior) durant esdeveniments extrems amb altes velocitats del vent solar.



Durant els equinoccis (primavera i tardor), l'eix de rotació de la Terra és perpendicular al pla eclíptic. Això afavoreix una interacció més efectiva entre el vent solar i la magnetosfera terrestre. En aquestes èpoques, el camp magnètic de la Terra està orientat de manera que facilita una major connexió amb el IMF transportat pel vent solar, efecte descobert el 1973. Això permet que les partícules solars entrin més fàcilment a la magnetosfera i hi hagi més activitat geomagnètica i, per tant, aurores més intenses.

7. Tempestes geomagnètiques



Una tempesta geomagnètica és la resposta del camp magnètic de la Terra a l'arribada de les partícules carregades d'una tempesta solar, amb fluctuacions en la intensitat i la direcció del camp magnètic de la Terra. Si són intenses, tindrem la cara amable de l'aparició de moltes aurores, però també, com veurem després, de possibles afectacions a la tecnologia.

Les dades que, en temps real, es tenen actualment del vent solar i de IMF provenen del satèl·lit *Deep Space Climate Observatory* (DSCOVR), que està en el punt L_1 de Lagrange (de la Terra cap al Sol, a 1.5×10^6 km), llançat per la NASA el 2015 ([Enllaç](#)). El punt L_1 és l'ideal per a missions solars com la DSCOVR, ja que això proporciona la valuosa oportunitat de mesurar els paràmetres del vent solar i del IMF entre 60 i 15 minuts abans que arribin a la Terra.

Abans de la missió DSCOVR, el satèl·lit *Advanced Composition Explorer* (ACE), també llançat per la NASA al punt L_1 , però el 1997, era el que proporcionava la informació sobre el vent solar.

Per a mesurar la intensitat o gravetat d'una tempesta s'usen dos indicadors:

- a) l'índex Kp (de l'alemany *Kennziffer Planetarische*, índex planetari, introduït per Julius Bartels* a la dècada de 1930). Mesura de l'activitat geomagnètica en una escala de 0 a 9, on 0 representa la calma completa i 9 representa el cas extrem. Aquest índex es calcula a partir de les variacions horàries del camp magnètic de la Terra mesurades a diverses estacions de tot el món.

Més sobre l'Índex Kp [aquí](#).

- b) La intensitat I de la variació del camp magnètic terrestre (en nT) per causa de l'activitat solar.

La NOAA classifica les tempestes geomagnètiques en cinc categories, que van de G1 a G5.

- G1 (menor): $K_p=5$, $I=30$ a 59 nT.

Aurores només en latituds altes i si hi ha problemes, seran menors.

- G2 (moderada): $K_p=6$, $I=60$ a 119 nT.

- G3 (forta): $K_p=7$, $I=120$ a 199 nT.

Aurores visibles en latituds mitjanes, possibles problemes de navegació per satèl·lit i riscos per a xarxes elèctriques.

- G4 (severa): $K_p=8$, $I=200$ a 329 nT.

Aurores visible en latituds tan meridionals com la península ibèrica, importants fluctuacions i problemes en xarxes elèctriques, degradació significativa en sistemes de navegació per satèl·lit.

- G5 (extrema): $K_p=9$, $I > 330$ nT.

Aurores visible en latituds molt baixes, greus problemes en xarxes elèctriques amb possibles apagades a gran escala, interrupcions greus en navegació per satèl·lit i comunicacions de ràdio HF.

La tempesta geomagnètica del 10 al 12 de maig de 2024 que va permetre veure aurores des de Catalunya i, fins i tot, des de Canàries, corresponia a una de G4 (vinculada a la taca solar AR13664).

L'estat del clima espacial es pot seguir en directe aquí: Space Weather Live: [Enllaç](#)

La radiació UV, la capa d'ozó i les tempestes geomagnètiques

Fins i tot, en condicions de tranquil·litat, com $K_p=1$, el Sol ja ens envia una bona dosi de radiació UV.

Hi ha tres tipus de raigs UV que arriben a la Terra, però la capa d'ozó (O_3) de l'atmosfera ens protegeix.

- UV-A (315-400 nm): La capa d'ozó no absorbeix gaire la radiació UV-A. Gran part d'aquesta radiació arriba a la superfície terrestre.

L'exposició prolongada a la radiació UV-A pot causar envelliment prematur de la pell, danys oculars, i contribueix al risc de càncer de pell.

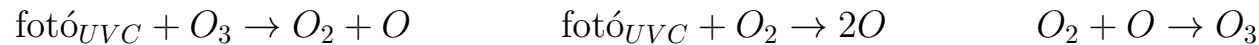
- UV-B (280-315 nm): La capa d'ozó absorbeix la major part de la radiació UV-B, però una fracció petita arriba a la superfície terrestre.

La radiació UV-B és més nociva i pot causar cremades solars, danys a l'ADN, càncer de pell i problemes oculars com les cataractes.

- UV-C (100-280 nm): Dels tres tipus de radiació UV, la C és la més nociva, però la capa d'ozó l'absorbeix completament i no arriba a la superfície.

La major concentració d'ozó es troba a l'estratosfera, formant la capa d'ozó entre aproximadament 15 i 35 km d'altitud. Aquesta capa actua com un escut que absorbeix més del 99% de la radiació UV-C i una gran part de la UV-B, protegint així la superfície de la Terra.

Tres reaccions encadenades —cicle de Chapman*— permeten que l'ozó vagi absorbint fotons UV-C però que també es vagi regenerant:



I quan hi ha una tempesta geomagnètica, s'altera la capa d'ozó?

Durant tempestes geomagnètiques i altres fenòmens solars, hi pot haver efectes temporals i locals en la ionització de l'atmosfera superior, però la capa d'ozó en si mateix no es veu significativament afectada de manera permanent. Això assegura que, fins i tot durant aquests esdeveniments, la protecció proporcionada per la capa d'ozó continua sent efectiva.

Les tempestes geomagnètiques: efectes adversos en la salut

- Radiació de partícules energètiques
 - Partícules del vent solar: Les tempestes geomagnètiques són causades per l'impacte de protons i electrons provinents del vent solar i de les ejeccions de massa coronal (CME) del Sol.
 - Impacte: Aquestes partícules poden penetrar en l'atmosfera superior de la Terra, especialment a les regions polars, i augmentar els nivells de radiació a grans altituds.
- Radiació de protons solars energètics
 - Esdeveniments de protons solars: Durant les tempestes solars, es poden accelerar grans quantitats de protons a energies molt altes que arriben a la Terra en una o dues hores.
 - Impacte: Aquests esdeveniments augmenten els nivells de radiació a altituds de vol comercials i a l'espai exterior.
- Radiació electromagnètica (EM)
 - Ràfegues de radiació UV i de raigs X: Les erupcions solars també poden emetre radiació electromagnètica intensa en forma de raigs X i radiació ultraviolada extrema.
 - Impacte: Aquesta radiació pot ionitzar les capes superiors de l'atmosfera terrestre, causant perturbacions en les comunicacions per ràdio i GPS. A nivell de la superfície terrestre, la major part d'aquesta radiació és absorbida per l'atmosfera i no arriba a afectar directament les persones.
- Radiació de fons en els vols polars i espacials
 - Vols a gran altitud i rutes polars: Els viatgers aeris en rutes polars i vols a gran altitud, estan exposats a nivells més alts de radiació còsmica durant tempestes geomagnètiques fortes.
 - Impacte: Encara que l'exposició és limitada per la curta durada dels vols, les tripulacions aèries que volen sovint a aquestes altituds poden acumular una dosi de radiació significativament més alta al llarg del temps.

Tempestes geomagnètiques: efectes adversos sobre la tecnologia

Les tempestes geomagnètiques poden tenir efectes adversos en diverses tecnologies sensibles. Les mesures de protecció varien segons la tecnologia de que es tracti. Vegem un breu resum dels efectes més freqüents i les estratègies de protecció utilitzades.

- Satèl·lits i sistemes espacials
 - Danys als components electrònics per radiació i/o anomalies en l'operació de satèl·lits.
 - Pèrdua temporal o permanent de satèl·lits.
 - Problemes en la comunicació i la navegació per satèl·lit (tipus GPS).

Protecció

- Desactivar o posar en mode segur els satèl·lits durant tempestes geomagnètiques intenses.
- Dissenyar components més resistents a la radiació.
- Utilitzar materials de blindatge per protegir els components electrònics.
- Ajustar les òrbites dels satèl·lits per minimitzar l'exposició a les pertorbacions geomagnètiques.

- Xarxes elèctriques

- Sobrecàrregues en transformadors i altres components de la xarxa.
- Corrents induïts geomagnèticament (CIG) que poden causar apagades.
- Danys permanents en els transformadors.

Protecció

- Implementar sistemes de monitorització en temps real per detectar corrents induïts geomagnèticament.
- Reduir la càrrega en els transformadors durant tempestes geomagnètiques severes.
- Utilitzar dispositius de protecció com reactors de neutre a terra i compensadors síncrons.
- Dissenyar transformadors i components de la xarxa amb una millor resistència als CIG.

- Sistemes de comunicació per ràdio
 - Disrupció en les comunicacions de ràdio d'ona curta i VHF.
 - Problemes en les comunicacions aeronàutiques i marítimes.

Protecció

- Utilitzar freqüències alternatives menys afectades per tempestes geomagnètiques.
- Augmentar la potència del senyal durant tempestes per mantenir la comunicació.
- Establir protocols alternatius de comunicació per a emergències.

- Aviació

- Problemes de navegació i comunicació per interferències en els sistemes de GPS.
- Exposició incrementada a radiació per a tripulacions i passatgers en rutes polars.

Protecció

- Ajustar rutes de vol per evitar les zones més afectades per tempestes geomagnètiques.
- Utilitzar sistemes de navegació alternatius en cas de fallada del GPS.
- Proporcionar informes en temps real sobre l'activitat geomagnètica als pilots i controladors aeris.

- Oleoductes i gasoductes

- Corrents induïts que poden accelerar la corrosió.

Protecció

- Monitoritzar i mitigar els corrents induïts geomagnèticament.
- Implementar sistemes de protecció catòdica més robustos.

Finalment, hi ha aurores en altres planetes?

El vent solar arriba molt lluny i Júpiter, Saturn, Urà i Neptú també tenen atmosfera i un camp magnètic propi important: doncs sí, també han de tenir aurores.

- Júpiter és el planeta amb el camp magnètic més important, seguit de la Terra. Com a element de comparació: a prop de la superfície de Júpiter, el seu camp magnètic val entre 0.4 i 1.4 mT.
I, precisament, per això, a Júpiter també es formen aurores molt intenses i brillants que, com a la Terra estan causades per la interacció del camp magnètic de Júpiter i el vent solar i, fins i tot, per partícules emeses pels propis satèl·lits de Júpiter, especialment, per Io. Aquestes aurores, que es poden observar des de la Terra, han estat estudiades pel la sonda Juno i pel Hubble.
- Les aurores de Saturn són també espectaculars, amb emissions de llum ultraviolada i infraroja. Has estat observades pel Hubble i la sonda Cassini.
- Urà té un camp magnètic inusual i inclinat respecte del seu eix de rotació, que fa les aurores en el planeta siguin diferents. Com per a Neptú, ja la sonda Voyager 2 i el Hubble n'han detectat però han estat poc estudiades.
- Mart, en no tenir camp magnètic, no té pràcticament aurores com a la Terra.
Venus tampoc té camp magnètic però allà se'n formen en l'espectre ultravioleta per la interacció del vent solar i la ionosfera del planeta.
- Pel contrari, Mercuri té un camp magnètic molt petit; i Venus, Mart o la Lluna, inexistents a efectes pràctics.

A. Alguns científics relacionats amb el Sol i el clima espacial



Hi ha diversos científics que han destacat en el coneixement del Sol, la corona solar, les tempestes solars i les aurores boreals o australs al llarg de la història de la ciència.

Aquí tenim alguns d'ells (no tots!), amb una breu descripció dels seus treballs i les seves contribucions:

- Galileo Galilei (1564-1642):

Astrònom italià que va realitzar observacions detallades del Sol amb el seu telescopi. Va descobrir les taques solars i va observar que el Sol té una superfície activa. Les seves observacions van contribuir a canviar la percepció del Sol com un cos celestial perfecte i inmutable (model aristotèlic).

- Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875):

Va ser un astrònom alemany conegut pel seu descobriment del cicle d'activitat solar d'11 anys.

Els treballs de Schwabe van ser continuats per altres científics, com Rudolf Wolf, qui va desenvolupar el “nombre de Wolf”, una manera estandarditzada de mesurar l'activitat de les taques solars.

- Richard Carrington (1826-1875):

Astrònom britànic que va fer una de les primeres observacions documentades d'una erupció solar significativa. Va observar una gran taqueta solar que va estar associada amb una forta erupció i va ser un dels primers a fer la connexió entre les taques solars i l'activitat magnètica del Sol.

- Edward Maunder (1851-1928):

Astrònom britànic que va estudiar les taques solars i va contribuir a la comprensió del cicle de l'activitat solar. Va ser un dels primers a reconèixer la relació entre l'activitat de les taques solars i les aurores boreals.

- Eugène Antoniadi (1870-1944):

Astrònom franco-grec que va realitzar observacions detallades del Sol i va desenvolupar tècniques per estudiar la seva superfície. Va contribuir a la comprensió de la dinàmica de les taques solars i altres fenòmens solars.

- Henri Deslandres (1853-1948):

Astrònom francès que va investigar les propietats de la corona solar i va desenvolupar mètodes per estudiar-la durant els eclipsis solars. Les seves observacions van ajudar a comprendre la composició i la dinàmica de la corona solar.

- Kristian Birkeland (1867-1917):

Físic noruec que va realitzar importants investigacions sobre les aurores boreals. Va proposar que les aurores eren causades per partícules carregades del Sol que interactuen amb el camp magnètic de la Terra. Les seves teories van ser fonamentals per comprendre la relació entre les aurores i l'activitat solar.

- Julius Bartels (1899-1964):

Destacat geofísic i meteoròleg alemany conegut per les seves contribucions a l'estudi de la geomagnetisme i la meteorologia espacial. És especialment reconegut per la seva feina en la investigació de les relacions entre l'activitat solar i les variacions geomagnètiques a la Terra.

- Sydney Chapman (1888-1970):

Matemàtic britànic que va fer contribucions importants a la comprensió de la dinàmica de l'atmosfera terrestre i les aurores boreals. Va desenvolupar models matemàtics per explicar com s'extén el camp magnètic solar per l'espai interplanetari.

- Eugene Parker (1927-present):

Físic estatunidenc que va formular la teoria del vent solar i va predir la existència de corrents de plasma calents que flueixen constantment des del Sol. La seva teoria va ser verificada per les observacions de les missions espacials, com ara la sonda “Parker Solar Probe”.

- Joan Feynman (1927-2020):

Astrofísica estatunidenca que va contribuir de forma important a l'estudi de les partícules i del camp del vent solar, les relacions Sol-Terra, i la física de la magnetosfera. En particular, Feynman és coneguda per haver desenvolupat una comprensió de l'origen de les aurores boreals.

(Per cert, Feynman és la germana petita del físic Richard Feynman. Atreta per l'astronomia i l'estudi de la ciència, malgrat que la seva mare i la seva àvia li volien treure del cap, es va convèncer que era apta per estudiar en llegir sobre les recerques d'investigació de l'astrofísica Cecilia Payne-Gaposchkin. Sobre aquestes dues grans investigadores podem llegir aquí [JF](#) i aquí [CPG](#)).

- Sami Solanki (1958-present):

Astrofísic alemany que ha fet importants contribucions a l'estudi de l'activitat solar i la variabilitat del Sol. Ha liderat diverses missions espacials i projectes d'investigació destinats a comprendre la física del Sol i els seus efectes en la Terra.

- Lucy Green (1975-present):

Astrofísica britànica que ha investigat els processos físics que tenen lloc a la corona solar i la seva influència en el clima espacial. Ha contribuït a l'educació pública sobre el Sol i el clima espacial a través d'una intensa activitat divulgativa en llibres i televisió.

B. Algunes recomenacions



- Space Weather Live: el clima espacial, en directe: [Enllaç](#)
- Space Weather Prediction Center, de la NOAA [Enllaç](#)
- Animació de com es creen les aurores [Enllaç](#)
- Infografia senzilla amb els colors de les aurores [Enllaç](#)
- Aurores boreals en el passat a la península ibèrica (Muyinteresante) [Enllaç](#)
- Explicació detallada sobre les aurores (Nature Phys 8, 321-324, 2012). [Enllaç](#)
- Explicacions sobre la magnetosfera [Enllaç](#)

Sobre les aurores vistes entre el 10 i 12 de maig de 2024

- Fotos des de Catalunya [Enllaç](#)
- Evolució de la taca solar AR 13664 “responsable” [Enllaç](#)
- Aurora boreal vista a Canaries [Enllaç](#)

I, ara per a relaxar-nos, podem veure qualsevol d'aquests pel·lícules:

- “Into the Wild” (Enmig de la Natura), de Sean Penn, de 2007 [Enllaç](#)
Bona pel·lícula que, a més, inclou diverses escenes on es poden veure aurores boreals.
- “Northern Lights”, de Mike Robe, 2009 [Enllaç](#)
Sobre una família que viu en Alaska. Amb impresionants imatges d'aurores boreals.
- “El núcleo” (*The Core*), de Jon Amiel, de 2003 [Enllaç](#)
Pel·lícula catastrofista de ciència-ficció en què el camp magnètic de la Terra desapareix d'un dia per l'altre.