

Il sistema Sole-Terra

Viaggio nello *Space Weather*

Appunti di fisica solare per gli Studenti della 5G



A cura di Mario Gatti

Osservatorio Solare

Istituto di Istruzione Secondaria Superiore “Valceresio” – Bisuschio

Marzo 2011

Contenuto

Introduzione

Dalla parte del Sole

Corona, Vento Solare, Eliosfera, campi magnetici e fenomeni rilevanti associati

Dalla parte della Terra

Ionosfera e campo magnetico

Tempeste Solari

Tempeste geomagnetiche

Tempeste di radiazione

Blackout radio

Onde Radio dal Sole

Che tempo farà?

La necessità e le possibilità di prevedere i disturbi dello Space Weather

Bibliografia

Sitografia e origine dei dati del Sun Daily Book

Glossario dei termini relativi al sistema Sole-Terra

Classificazione NOAA/SWPC dei fenomeni connessi con lo Space Weather

I nostri telescopi

Introduzione

Lo studio delle connessioni tra ciò che accade sul Sole e le sue possibili ripercussioni sulla Terra, concetto reso molto bene dal termine inglese *Space Weather*, a volte però tradotto un po' semplicisticamente e frettolosamente con *meteorologia spaziale*, è scienza relativamente giovane e soprattutto piuttosto complessa. Anche un approccio solamente fenomenologico (che si limita alla presentazione di fenomeni senza indagare più di tanto sulle cause che li possono produrre) non è affatto semplice, mentre una trattazione rigorosa e completa si scontra inevitabilmente con un formalismo matematico di notevole difficoltà, che coinvolge analisi, calcolo differenziale e tensoriale, teoria e metodi di risoluzione spesso non analitici (quindi numerici o statistici) di equazioni differenziali o integro differenziali alle derivate parziali. Tutti argomenti che vanno troppo al di là di quelle che sono le conoscenze e le abilità matematiche e fisiche di uno studente di ultimo anno di Liceo Scientifico, per il quale sono stati pensati e scritti questi appunti.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di fornire delle semplici linee guida sull'argomento, cercando il migliore compromesso tra la descrizione del testo ed una certa sistematicità e schematicità dei risultati che si spera sia utile per la comprensione, sia pure ad un livello estremamente basilare, dei concetti fondamentali dello *Space Weather*. Sono da ritenersi indispensabili alcune conoscenze pregresse, che verranno date per acquisite: sapere come è strutturato il Sole e quali sono le principali caratteristiche chimico-fisiche della stella, come avviene la produzione ed il trasporto dell'energia dalla parte più interna attraverso la zona radiativa e poi quella convettiva, separate dalla *tacochline*. E ancora come è strutturata la cosiddetta atmosfera solare, convenzionalmente suddivisa in cromosfera, zona di transizione e corona. Alcune proprietà di quest'ultima, in quanto è in essa che avvengono la maggior parte dei fenomeni che ci interessano in questa sede, saranno oggetto di particolare approfondimento nel seguito.

Questi appunti sono organizzati in cinque parti: nella prima verranno illustrate le principali proprietà della corona, del vento solare, dell'eliosfera e del campo magnetico solare e interplanetario (IMF o *Interplanetary Magnetic Field*). Nella seconda si tratterà degli strati più esterni dell'atmosfera terrestre (segnatamente la ionosfera), che in quanto tali sono coinvolti direttamente nell'interazione con il Sole. Si proseguirà poi con una descrizione fenomenologica e schematica delle cosiddette tempeste solari, termine che come vedremo merita molti *distinguo*, per passare poi alle principali proprietà dell'emissione di onde radio da parte del Sole (il cosiddetto *radiosole*). Infine ci occuperemo delle possibilità di previsione degli eventi solari che potrebbero influenzare in tempi brevi il nostro pianeta (*Space Weather Forecasting*). Seguono alcune appendici, nelle quali saranno illustrate le origini dei dati che vengono quotidianamente immagazzinati nel nostro Osservatorio nel Sun Daily Book e riguardanti il monitoraggio dell'attività solare e geomagnetica, un glossario dei principali termini interessanti per lo studio del sistema Sole-Terra, una breve descrizione dei telescopi usati in Osservatorio per lo studio sistematico della fotosfera (calcolo del numero di Wolf non ridotto) e dell'attività al lembo in cromosfera (protuberanze e numero di Pettis). Il lavoro si chiude con una dettagliata sitografia e una bibliografia essenziale per eventuali approfondimenti. Nel testo si farà volutamente uso di terminologia e acronimi in lingua inglese, in quanto la loro traduzione (quasi sempre fornita comunque) può però essere incompleta e a volte fuorviante rispetto al vero significato, si pensi all'equivoco tra flare e brillamento, considerati spesso sinonimi senza di fatto esserlo in realtà.

1) Dalla parte del Sole

Corona, Vento Solare, Eliosfera, campi magnetici e fenomeni rilevanti associati.

Spesso si sente parlare del Sole come di una “sfera di gas incandescente”. L’immagine è sicuramente molto evocativa, ma contiene alcune imprecisioni, anche grossolane. Prima di tutto parlare di sfera è quantomeno improprio, in quanto viene richiamata alla mente una forma dal contorno definito che, se effettivamente così appare ad un’osservazione diretta della stella, non esiste ed è dovuta solo all’opacità del Sole al di sotto della fotosfera ed alla sua trasparenza al di sopra, perlomeno per l’occhio umano. In secondo luogo è sì vero che la materia di cui si compone il Sole non è certo allo stato né liquido né solido, ma non assomiglia proprio ad un gas così come lo intendiamo nel nostro immaginario collettivo, tipo il metano che usiamo per il riscaldamento delle nostre case. Il Sole è fatto di *plasma*.

I plasmi sono fluidi le cui particelle costituenti sono cariche elettricamente. Il termine fu inventato da Tonks e Langmuir nel 1929 per indicare uno stato della materia formato da molecole e atomi neutri e da una frazione di elettroni liberi e ioni sufficiente a creare una carica elettrica complessiva. Tonks e Langmuir fecero notare che “... *quando gli elettroni oscillano, gli ioni positivi si comportano come una gelatina rigida*” e quindi probabilmente ci videro un’analogia con il comportamento del sangue umano, in cui dei corpuscoli oscillano nel plasma del sangue.

Nei plasmi molto caldi, come quelli degli interni stellari e quindi anche del Sole, la ionizzazione è praticamente completa per tutti i livelli energetici, mentre al diminuire della temperatura, come nella corona solare o al limite nel mezzo interstellare, molto “freddo”, sono ionizzati solo alcuni livelli, chiaramente i più esterni rispetto ai nuclei degli atomi.

Lo stato di plasma è considerato una sorta di quarto stato della materia, che si ottiene come evoluzione dello stato gassoso quando le forze elettrostatiche di coesione atomiche vengono sopraffatte da perturbazioni dissociative (per esempio urti termici).

Tornando allo specifico del Sole, uno dei risultati teorici più importanti dell’astronomia moderna è senz’altro il *Modello Solare Standard*, nel quale le grandezze fondamentali per la descrizione del comportamento chimico-fisico della stella come pressione, densità, temperatura e massa molecolare media sono espresse essenzialmente solo in funzione di due variabili: la distanza dal centro e il tempo. Il Modello Solare Standard descrive egregiamente la fisica dell’interno del Sole e del trasporto dell’energia dal nucleo verso le parti più esterne, che avviene prima per radiazione e poi per convezione. Grazie a questo modello è stato possibile sviluppare anche delle convincenti teorie riguardo ai cicli periodici di attività del Sole, coinvolgendo la sua rotazione differenziale. Il Modello Solare Standard introduce inoltre un concetto basilare di fisica solare, utile per comprendere i complessi meccanismi convettivi che avvengono al di sopra della tachocline: quello della scala di rimescolamento o *mixing length*. Semplificando al massimo la cosa, si assume che le celle convettive, cioè le bolle di materia che si muovono verso l’alto o verso il basso a seconda che la loro temperatura sia maggior o minore di quella media del mezzo circostante, percorrano una distanza caratteristica, la *mixing length* appunto, prima di dissolversi e mettersi in equilibrio termico con il mezzo stesso. La *mixing length* può anche essere intesa come la distanza media percorsa da una certa specie ionica nella zona convettiva prima di perdere la sua identità, ad esempio uno ione H^+ che si neutralizza per cattura di un elettrone libero del plasma.

Sarebbe troppo bello se queste teorie rendessero conto anche di tutte le altre evidenze presentate dal Sole in altre sue parti, come la corona. La corona solare, nonostante sia formata da un plasma molto più rarefatto e di composizione ionica ben diverso da quello delle parti sottostanti, presenta una temperatura molto più alta (fino a quasi due milioni di gradi) della fotosfera e della cromosfera. Quello della “corona calda” è uno dei problemi ancora aperti in fisica solare e sebbene abbia trovato

negli ultimi tempi diverse interpretazioni (come quella della riconnessione magnetica e dei microflares o altre che coinvolgono le cosiddette Onde di Alfvén di cui parleremo brevemente più avanti) è ben lontano dall'essere stato pienamente risolto. Ma non è l'unico.

Il primo grande problema che si è presentato ai fisici solari è stato quello della natura stessa della corona. Un punto di partenza per cercare di capirci qualcosa è quello di supporre che la corona, in prima approssimazione, sia statica, a simmetria sferica e praticamente isoterma. Una sorta di palla da tennis dall'aspetto immobile e tutta alla stessa temperatura. L'equilibrio meccanico della corona implica in questo caso che la ricaduta gravitazionale della materia verso l'interno del Sole sia compensata da una "forza di pressione" verso l'esterno (condizione di equilibrio idrostatico). Il risultato che si ottiene imponendo queste condizioni è però decisamente inaccettabile, in quanto si giunge alla conclusione che la densità del plasma coronale ad una distanza infinita dalla corona è di circa 4 ordini di grandezza maggiore di quella del mezzo interstellare, il che esclude l'ipotesi di una corona statica isoterma. Se si abbandona l'ipotesi della isotermicità e si suppone (ragionevolmente) che la temperatura diminuisca con l'aumentare della distanza dal centro del Sole si arriva ad un risultato ancora più assurdo, quello di una pressione che non si annulla e di una densità che diverge, cioè tende all'infinito, a distanza infinita dal centro della stella.

Sulla base di queste considerazioni Eugene Parker nel 1958 propose l'idea che la corona non potesse essere in equilibrio statico né tantomeno isoterma, ma fosse piuttosto un sistema dotato di un moto di espansione e che emanasse dal Sole un flusso stazionario di plasma, chiamato *vento solare*. Nel suo lavoro Parker calcolò le caratteristiche di questo flusso arrivando a proporre risultati che oggi trovano piena conferma nelle analisi sperimentali *in situ*, cioè compiute fuori dalla Terra il più vicino possibile al Sole da parte di sonde spaziali. Già nel 1959 le sonde russe Lunik 2 e 3 furono in grado di misurare effettivamente un flusso di ioni provenienti dal Sole. Questi primi dati furono poi definitivamente confermati nel 1961 dall'Explorer 10 della NASA ed infine nel 1962 il Mariner 2, in viaggio verso Venere, fu in grado di misurare le velocità supersoniche del flusso, comprese tra i 400 ed i 700 Km al secondo e associate al moto di rotazione del Sole. In tempi molto più recenti la sonda Ulysses ha compiuto indagini parecchio più accurate sul vento solare, mostrati in Figura 1. Nonostante sia essenzialmente semplice, la teoria di Parker fornisce una descrizione soddisfacente della natura e delle proprietà del vento solare se pur limitatamente a quello chiamato veloce, proveniente dalle regioni ad alta latitudine o dai buchi coronali. Per quanto riguarda il vento cosiddetto lento le cose si complicano in quanto nella trattazione deve essere introdotto in modo consistente il campo magnetico, il che fa crescere notevolmente le difficoltà. I concetti di vento solare veloce e lento ed i buchi coronali diventano a questo punto i nostri argomenti più importanti da discutere.

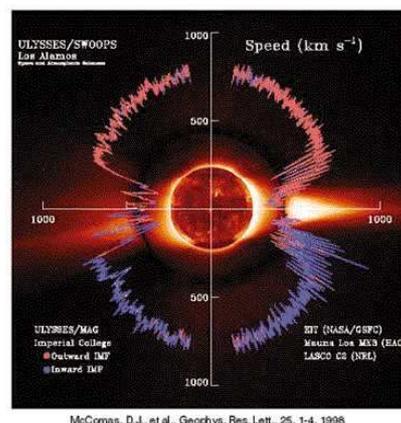
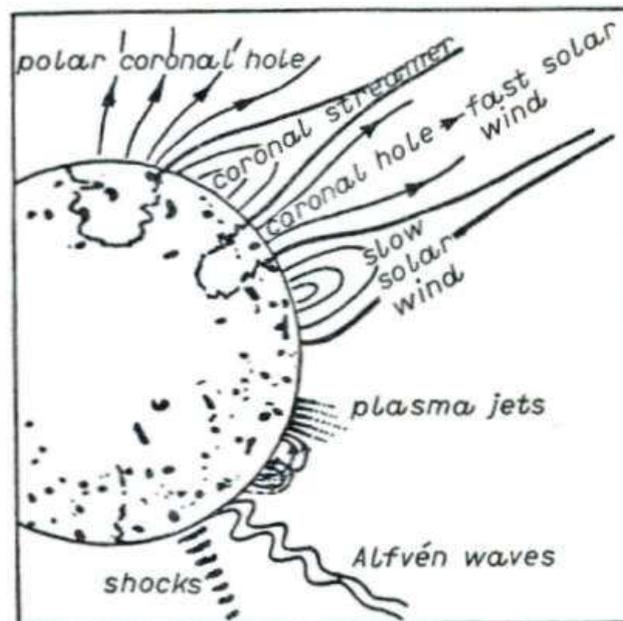


Fig.1: diagramma polare che mostra le velocità del vento solare in funzione della latitudine eliografica, misurate dalla sonda Ulysses in orbita polare attorno al Sole durante il minimo del ciclo 23. Si noti come la velocità è bassa nel piano equatoriale ed aumenta progressivamente verso le regioni polari. La situazione cambia drasticamente in prossimità di un massimo del ciclo di attività solare, come confermato da altre immagini di Ulysses per il ciclo 23.

Il vento solare è quindi il plasma caldo che si espande dalla corona solare in tutte le direzioni, con velocità che vanno da valori leggermente inferiori ai 300 fino a oltre i 1000 Km al secondo durante eventi episodici e legati ad eventi energetici come i flare e le emissioni coronali. In condizioni regolari il vento solare può essere caratterizzato da due regimi di plasma: il vento solare veloce proveniente dai *buchi coronali* (coronal holes) con una velocità fino a 800 Km al secondo, ed il *vento solare lento* proveniente da altre regioni della corona, in particolare dalle regioni attive bipolari (quelle che spesso presentano le macchie solari come controparte fotosferica) e da strutture di grandi dimensioni denominate *coronal streamers* (getti coronali), con velocità fino a 400 Km al secondo. Il vento solare, come la corona, è composto principalmente da particelle cariche: protoni, elettroni ed una piccola parte (5%) di elio ionizzato e pochi ioni di elementi più pesanti. Il disegno schematico della Figura 2 mostra alcune caratteristiche che possono essere viste nelle immagini coronali fatte con i coronografi e durante le eclissi totali: streamers di grandi dimensioni, che danno contributo al vento solare lento, e buchi coronali, da dove proviene il vento solare veloce. La corona, su scale più piccole, è anche un mezzo dinamico, con getti di plasma, onde d'urto (shocks) e perturbazioni del campo magnetico chiamate onde di Alfvén. Queste strutture e perturbazioni caratterizzano il mezzo interplanetario tra il Sole ed i pianeti del sistema solare, e contribuiscono alla sua dinamica. Vediamo ora più da vicino cosa sono i buchi coronali e le onde di Alfvén.



D. Intriligator, Int. Course of Physics E. Fermi, Varenna 1985; reproduced with permission, © D. Intriligator & Italian Physical Society

Fig. 2: illustrazione schematica della corona solare e degli elementi ed eventi ad essa collegati

Partiamo dai buchi coronali: le immagini del Sole nei Raggi X rivelano l'esistenza di strutture brillanti a forma di arcate (*loops*) che evidenziano le linee del campo magnetico. Queste arcate sono in genere chiuse, ma esistono frequenti casi nei quali sono di forma "aperta" e sembrano irradiarsi verso l'esterno del Sole senza richiudersi su loro stesse. Le prime sono tipiche delle regioni attive, le seconde sono associate spesso ai buchi coronali. Questi non sono altro che ampie regioni in cui non si ha praticamente emissione di radiazione elettromagnetica da parte della corona e si notano esclusivamente nei Raggi X e nell'ultravioletto estremo. Si trovano prevalentemente nelle regioni polari durante i minimi dei cicli solari (*polar coronal holes*), mentre a cavallo dei massimi si estendono fino all'equatore e spesso lo attraversano, formando quelli che si chiamano *buchi coronali transequatoriali*. Qualche volta sono stati osservati simili strutture che attraversano praticamente tutta la corona, da un polo all'altro del Sole. Studi dettagliati hanno dimostrato che non esistono differenze di temperatura tra i due tipi di regioni coronali, quelle brillanti e quelle

scure, ma che la differenza di emissione è semplicemente dovuta alla diversa densità. L'emissione coronale nei Raggi X è infatti praticamente proporzionale al quadrato della densità: un rapporto di densità dell'ordine di un fattore 10 porta ad una diminuzione di un fattore 100 nell'emissione. Poiché la densità elettronica media in un buco coronale è dell'ordine di 2×10^5 elettroni cm^{-3} contro i 3×10^6 elettroni cm^{-3} nelle regioni brillanti, si vede che il rapporto di densità è appunto di un fattore 10 il che spiega perché i buchi coronali siano più scuri per motivi di densità e non perché più freddi del mezzo circostante, come le macchie in fotosfera.

E veniamo alle Onde di Alfvén (*Alfvén waves*): dal punto di vista fisico, un'onda di Alfvén è una perturbazione ondulatoria del plasma che si propaga tramite l'oscillazione di ioni all'interno di un campo magnetico. L'onda si propaga in direzione del campo magnetico, sebbene le onde esistano anche con un'incidenza obliqua; quando la propagazione è perpendicolare al campo magnetico le onde sono dette magnetosoniche. Il moto degli ioni e la perturbazione del campo magnetico avvengono nella stessa direzione, mentre risultano trasversali alla direzione di propagazione dell'onda. L'onda si propaga con la velocità:

$$v_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 n_i m_i}}$$

dove v_a è la velocità dell'onda di Alfvén, \mathbf{B} è l'intensità del campo magnetico, μ_0 è la permeabilità magnetica del plasma, n_i è la densità del numero di ioni e m_i è la massa degli ioni. Dalla formula della velocità si deduce facilmente che in presenza di campi magnetici molto intensi o di piccole densità ioniche, la velocità dell'onda di Alfvén si approssima a quella della luce e di conseguenza l'onda di Alfvén assume i connotati di una vera e propria onda elettromagnetica.

Il nome di Alfvén è legato anche ad un noto teorema della fisica dei plasmi in presenza di campi magnetici (chiamata Magnetoidrodinamica o MHD) che, come vedremo, trova applicazioni e implicazioni fondamentali anche nel caso del Sole, in quanto costituito proprio di plasma immerso in campo magnetico. Il teorema di Alfvén è complicato come dimostrazione (e qui ci guarderemo bene dal presentarla) ma è piuttosto semplice come enunciato. Data la sua importanza in fisica solare, è quanto meno doveroso parlarne.

Il Teorema di Alfvén afferma che in un fluido conduttore con resistività nulla (o molto piccola, come un plasma), le linee di campo magnetico rimangono congelate in un dato volume del fluido (*frozen-in flux*). Questo teorema spiega una certa varietà di fenomeni nel campo magnetico del Sole, in quello interplanetario, nella magnetosfera terrestre e nei plasmi in generale. Prendiamo una superficie di flusso \mathbf{S}_1 al tempo t , che viene trascinata dalla velocità del fluido \mathbf{v} nel tempo Δt alla posizione \mathbf{S}_2 . Siano \mathbf{n}_1 ed \mathbf{n}_2 i due versori normali alle due superfici. L'enunciato del teorema implica che, se le linee di campo magnetico rimangono congelate nel cilindretto di fluido delimitato da \mathbf{S}_1 , \mathbf{S}_2 e di altezza $\mathbf{v}\Delta t$, la variazione nel tempo del flusso magnetico dentro il cilindretto è nulla, cioè la derivata $d\Phi/dt$ del flusso rispetto al tempo è uguale a zero (Figura 3).

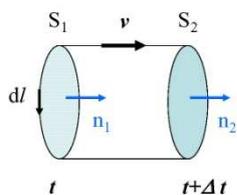


Fig. 3: illustrazione del teorema di Alfvén. Il flusso del campo B all'interno del cilindretto non varia nel tempo.

Quindi in un plasma immerso in un campo magnetico le linee di flusso del campo non sono libere di andare a spasso dove vogliono: sono forzate a rimanere come intrappolate nel mezzo ionizzato che funge quindi da “trasportatore di campo e di flusso”. Come vedremo a proposito del campo magnetico coronale questo risultato assumerà dei contorni essenziali nella comprensione di molti fenomeni relativi al sistema Sole-Terra ed allo *Space Weather*.

Intanto possiamo trarre subito alcune conclusioni da quanto detto: il vento solare trasporta il campo magnetico del Sole nel mezzo interplanetario. Mentre vicino al Sole il campo magnetico è abbastanza intenso da trattenere il plasma e configurare la corona, a una certa distanza dalla superficie solare il plasma caldo domina il campo magnetico, e ne trascina le linee di forza all'esterno. La rappresentazione schematica in Figura 4, sovrapposta ad un'immagine della corona registrata da SOHO nel 1996, indica le linee di campo che, a partire da una certa distanza, si allineano con il flusso del vento solare, che qui è assunto essere semplicemente radiale.

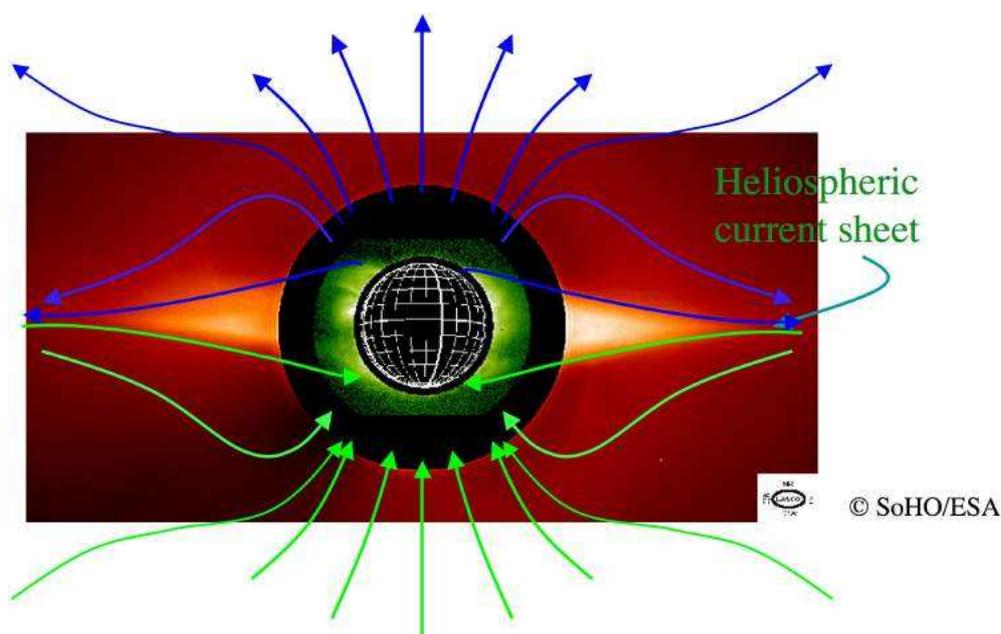


Fig.4: le linee del campo magnetico coronale. La superficie di separazione tra le polarità opposte del campo è detta *Heliospheric Current Sheet (HCS)*, si veda il testo in seguito.

Le zone del campo che presentano una polarità opposta sono divise da una superficie ideale di separazione chiamata *Heliospheric Current Sheet* (letteralmente foglio di corrente eliosferica) acronimizzata in HCS. Il nome è dovuto al fatto che la variabilità del campo magnetico induce in questa zona delle deboli correnti elettriche che comunque occupano tutto lo spazio dove ha sede il campo stesso. Se il Sole non ruotasse attorno al suo asse e se il suo campo magnetico avesse una configurazione statica e simmetrica (detto in altri termini: se non esistessero i cicli solari) la HCS sarebbe una sottile superficie piana parallela all'equatore solare. Invece la sua forma non è mai la stessa proprio perché il Sole ruota ed il campo magnetico cambia la sua polarità in ogni ciclo di attività. La Figura 4 rappresenta idealmente la HCS per un Sole fermo ed al minimo di un ciclo di attività. La forma effettiva, nello spazio tridimensionale, della HCS è invece rappresentata da un modello detto a gonna di ballerina (*ballerina-skirt model*), che viene adottato di solito anche per illustrare l'andamento delle linee del campo magnetico, di cui parleremo tra poco e che è illustrato nella Figura 5 alla pagina seguente.

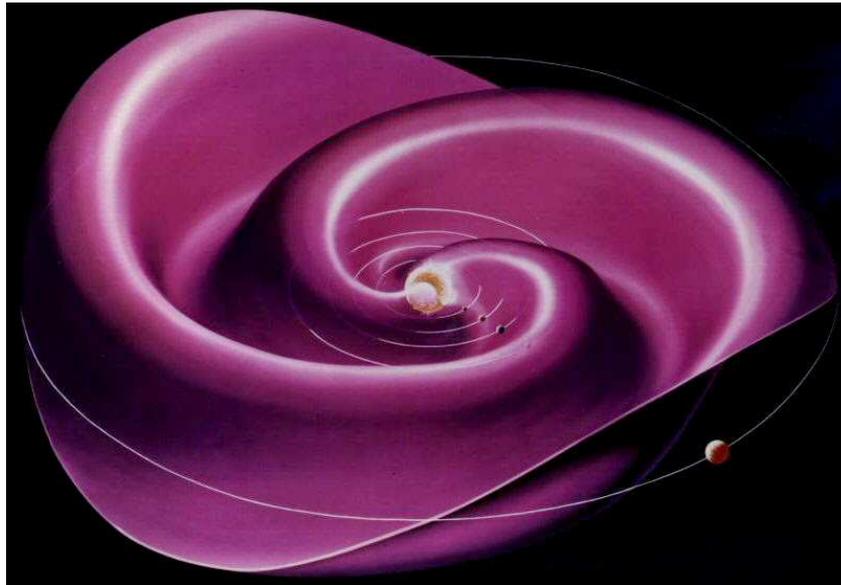


Fig.5: lo sviluppo in tre dimensioni della Heliospheric Current Sheet ricorda l'aspetto della gonna di una ballerina che gira su se stessa, da cui il nome "ballerina-skirt". Notare come i tre pianeti più interni del sistema solare, tra i quali la Terra è il terzo, siano "toccati" sola dalla "prima piega" della gonna, che origina dall'emisfero occidentale del Sole. Le orbite di pianeti più esterni, come Marte, Giove attraversano la HCS in più "pieghe della gonna". La forma della "ballerina skirt" cambia a seconda della fase del ciclo solare e della rotazione della stella.

Questi concetti hanno delle notevoli implicazioni: per il Teorema di Alfvén le linee di campo che si estendono nello spazio interplanetario rimangono connesse al Sole e ruotano con esso. Il flusso radiale del vento solare è simile al flusso di acqua emesso da un irrigatore che ruota in giardino e la traiettoria delle gocce d'acqua è curvata dalla rotazione dell'irrigatore. Seguendo una particella di vento solare un osservatore sul Sole vedrebbe la stessa cosa con il campo magnetico allineato con questa traiettoria. È per questo che le linee del campo magnetico nel mezzo interplanetario sono curve. Queste linee, osservate dal polo nord del Sole, hanno la forma di una spirale di Archimede, chiamata anche spirale di Parker, dopo che Eugene Parker, nel 1958, sviluppò il primo modello idrodinamico del vento solare con il campo magnetico "congelato" (*frozen-in*) in esso. Come si vede nella Figura 6, la linea del campo magnetico a spirale di Parker collega la Terra con un punto localizzato nell'emisfero ovest del Sole a destra del centro del disco solare.

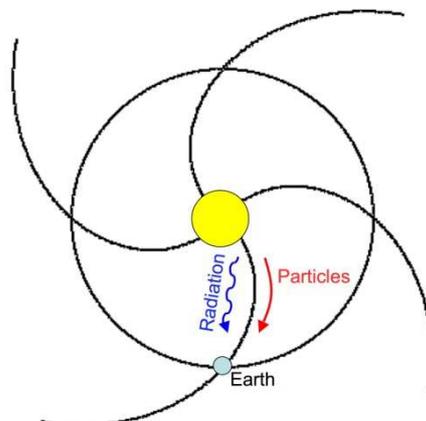


Fig.6: la Spirale di Parker in due dimensioni osservata idealmente dal polo nord del Sole.

La Figura 6 potrebbe essere sostituita dalla Figura 5 se il punto di vista fosse quello di un osservatore situato idealmente oltre l'orbita di Giove e comprendesse le tre dimensioni spaziali effettive. Da notare che la radiazione elettromagnetica (ad esempio i Raggi X emessi in un flare) nel suo viaggio verso la Terra percorre una traiettoria rettilinea, mentre le particelle che compongono il vento solare e quelle che vengono accelerate in un flare o in una emissione di massa coronale sono obbligate, per il Teorema di Alfvén, a rimanere connesse con le linee del campo e pertanto si muovono lungo un braccio (curvo) della spirale di Parker o, se si preferisce, lungo una piega della gonna della ballerina, ed appaiono provenire dall'emisfero occidentale del Sole. C'è una evidente prova sperimentale a conferma di questo modello.

Infatti, se ammettiamo che le particelle cariche che vengono accelerate sul Sole ed espulse ad alte energie nello spazio debbano viaggiare lungo il campo magnetico interplanetario e che l'andamento di quest'ultimo venga descritto da una spirale di Parker, ci aspettiamo di rivelare a Terra particelle energetiche provenienti dall'emisfero ovest del Sole. Le osservazioni confermano in senso statistico questa previsione: l'istogramma mostrato in Figura 7 mostra la distribuzione in longitudine solare (longitudine eliografica) dei flare associati con flussi di particelle ad alta energia dirette verso la Terra. Il massimo della distribuzione di questi eventi è nell'intervallo 30°-60° di longitudine ovest, come previsto se le particelle energetiche si propagano lungo le linee della spirale di Parker. Tuttavia ci sono eccezioni notevoli, come ad esempio quelle relative a particelle energetiche provenienti dall'emisfero est del Sole o associate a possibili brillamenti localizzati in una parte del lembo est del sole. La spirale di Parker fornisce un semplice modello di una configurazione media del campo magnetico, ma non necessariamente la configurazione reale in ogni singolo evento.

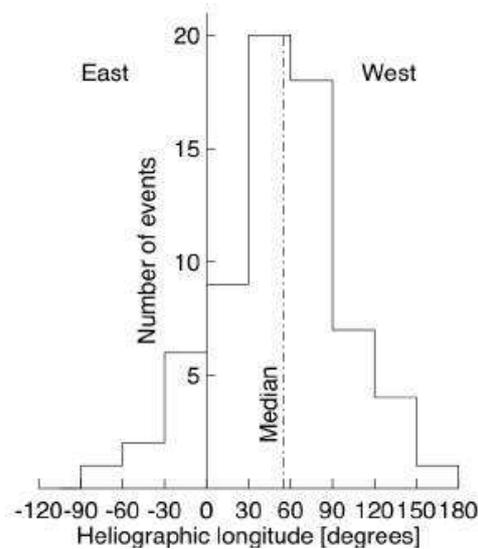


Fig.7: gli eventi energetici associati all'arrivo di particelle energetiche verso la Terra sono distribuiti in modo asimmetrico rispetto al meridiano centrale del Sole. La maggior parte di loro proviene dall'emisfero occidentale e la mediana dell'istogramma è posta poco prima dei 60° di longitudine eliografica W. Un eccellente esempio di conferma indiretta del modello della spirale di Parker.

Il vento solare, essendo formato da particelle elettricamente cariche (ioni ed elettroni) in moto in tutte le direzioni verso l'esterno della corona, è sede di un debole campo magnetico di intensità dell'ordine di poche decine di nT, chiamato campo magnetico interplanetario (o IMF, *Interplanetary Magnetic Field*). Alcuni autori chiamano questo campo HMF (*Heliospheric Magnetic Field* o campo magnetico eliosferico, dove per eliosfera come vedremo tra poco si intende la regione dello spazio attorno al sole nella quale il vento solare ha una velocità sufficiente per vincere la pressione del vento interstellare), mentre utilizzano il termine IMF per indicare il campo

eliosferico compreso solo tra il Sole e la Terra. Nel seguito noi seguiremo la prima convenzione, per cui chiameremo campo magnetico interplanetario o IMF quello che dal Sole, grazie al vento solare, viene trasportato per tutta l'eliosfera, con il suo flusso congelato (*frozen-in*) nel mezzo che lo trasporta.

Questo campo può essere descritto usando diversi sistemi di coordinate. Il più semplice e pratico di questi è il cosiddetto sistema GSMCS, che sta per *Geocentric Solar Magnetospheric Coordinates System*, spesso abbreviato semplicemente in GSM, nel quale il vettore **B**, intensità del campo IMF, viene scomposto in tre componenti perpendicolari (si veda la Figura 8 nel seguito): una, **B_x**, è nella direzione Terra-Sole e giace nel piano dell'eclittica con verso positivo verso la Terra, la seconda, **B_y**, giace sempre nel piano dell'eclittica e punta verso l'Est terrestre, mentre la terza, **B_z**, è perpendicolare al piano dell'eclittica ed è considerata di verso positivo se orientata verso il polo nord geografico terrestre. Il tutto immaginando la Terra al centro del sistema Terra-Sole, da cui il nome di Geocentrico. Vedremo in seguito come la componente **B_z** assuma un ruolo fondamentale nella possibilità che si verifichino eventi geomagnetici, ossia interazioni tra il vento solare ed il campo magnetico della Terra all'interno del suo confine ideale, detto magnetopausa.

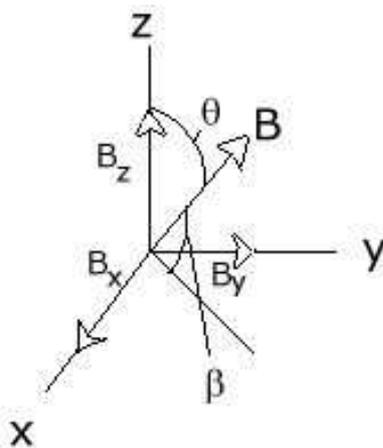


Fig. 8: il sistema di coordinate GSM per il campo magnetico interplanetario o IMF.

Valgono le relazioni: $B = (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)^{1/2}$; $\theta = \cos^{-1}(B_z / B)$; $\beta = 90^\circ - \theta$

Come già accennato poco più sopra, il vento solare, in forza della “spinta” che riceve lasciando la corona, si muove a velocità supersonica (relativamente al mezzo interplanetario) fino a quando, arrivato troppo lontano dal Sole, la sua velocità scende al di sotto di quella del suono (subsonica). La zona dello spazio in cui questo avviene è chiamata *Termination Shock*. Pur essendo più lento, il vento solare prosegue comunque ad una velocità maggiore di quella media delle particelle che compongono il mezzo interstellare fino alla *Eliopausa*, dove viene arrestato dalla pressione del vento interstellare. Però, come una nave che si muove più velocemente dell’acqua in cui si trova o un aereo che si muove più velocemente del suono nell’aria, il vento stellare genera un’onda d’urto davanti a lui; in corrispondenza del fronte di quest’onda realmente il vento interstellare (che possiamo immaginare proveniente in maniera isotropa da tutte le altre stelle oltre il Sole) e quello solare raggiungono un equilibrio cinetico e di pressione. Questa zona è detta *bow-shock* (onda di prua o di prora). Vedremo in seguito come il concetto di onda di prua sia essenziale per capire alcune perturbazioni del mezzo interplanetario e connesse con le emissioni coronali. Tutto l’ambiente circondante il Sole in cui il vento solare fa sentire la sua presenza è detto *Eliosfera* ed anche se il suo confine ideale è l’eliopausa di fatto esso si può identificare con il bow-shock. La figura 9 alla pagina seguente illustra dettagliatamente quanto esposto a proposito dell’Eliosfera:

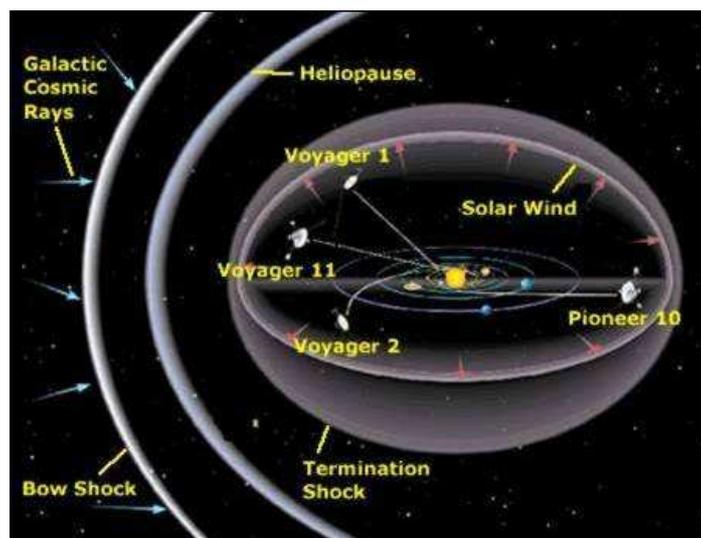


Fig. 9: Illustrazione schematica dell'eliosfera, con i suoi confini (eliopausa e bow-shock) e del termination shock, l'onda d'urto generata dal passaggio da supersonico a subsonico della velocità del vento solare. In figura sono indicate anche le posizioni attuali di alcune sonde lanciate molto tempo fa in direzioni opposte rispetto al Sole, che ormai hanno raggiunto quasi il termination shock e viaggiano verso l'eliopausa, inviando a Terra ancora dati utilissimi circa la velocità, la densità e la pressione del vento solare quasi ai limiti della sua "zona di esistenza".

L'estensione dell'Eliosfera è incerta, ma viene stimata in parecchie decine di unità astronomiche. Nella Figura 9 la "bolla interplanetaria" identificata con l'eliosfera viene rappresentata in maniera piuttosto simmetrica rispetto al Sole. In realtà l'eliosfera è fortemente "stirata" nella direzione opposta al moto proprio del Sole (quindi verso destra nella figura, nella quale il Sole si muove verso sinistra) ed "accorciata" davanti al Sole. Questo è dovuto alla presenza del vento stellare, così come quello solare produce gli stessi effetti sulla magnetosfera, la zona dove si estende il campo magnetico della Terra nello spazio attorno ad essa: la magnetosfera assume una forma decisamente asimmetrica, ancora più marcata di quella eliosferica, vista la vicinanza del Sole alla Terra, per cui il nostro pianeta è investito da un vento solare ad alta velocità anche in condizioni di Sole quieto.

Riprenderemo questo argomento nella sezione successiva. Ora dobbiamo occuparci degli eventi che possono produrre delle perturbazioni nell'eliosfera e nel campo magnetico interplanetario, che saranno poi identificati come possibili cause di effetti di interazione nel sistema Terra-Sole. Parliamo allora di Regioni di Interazione Corotanti ed Emissioni di Massa Coronali.

Brevemente, visto che si tratta di un argomento abbastanza complicato, diciamo qui solo che le Regioni di Interazione Corotanti (CIR o *Corotating Interaction Regions*) sono zone della corona dove il flusso del vento solare lento, proveniente ad esempio da una regione attiva, interagisce con quello veloce emesso da un buco coronale. Le CIR hanno una struttura magnetica abbastanza complessa ed una geometria complicata, determinata dalla rotazione del Sole e dalla latitudine eliografica alla quale si manifestano. Ci basti sapere qui che sono collegabili con degli eventi geomagnetici ricorrenti con la stessa periodicità della rotazione solare equatoriale (circa 27 giorni), chiamati *substorms*. Questa periodicità giustifica il nome di *corotanti* attribuito a queste strutture, visto che i loro effetti si possono manifestare ripetutamente dopo un intervallo temporale pari ad una rotazione solare equatoriale (detta *rotazione di Carrington*) e quindi appaiono ruotare rigidamente connesse con la corona.

Sulle Emissioni di Massa Coronali (CME o *Coronal Mass Ejections*) vale invece la pena di spendere qualche parola in più. Per definizione, una CME è un cambiamento osservabile nella struttura della corona che avviene su una scala temporale da alcuni minuti a diverse ore, connesso con l'espulsione di gigantesche nubi di plasma (*coronal clouds*) verso l'esterno del Sole.

Le CME sono osservabili solo attraverso i coronografi, strumenti posti a bordo di sonde spaziali (come SOHO, sul quale opera il coronografo chiamato LASCO, che sta per *Large Angle and Spectrometric Coronagraph*) ed appaiono a volte come evidenti emissioni luminose dirette vicino al piano equatoriale in prossimità dei minimi dei cicli solari e sempre più vicine alle zone polari in corrispondenza dei massimi. A questo aumento di luminosità è associata l'espulsione di un numero impressionante di tonnellate al secondo di plasma coronale, che muovendosi ad alta velocità nel mezzo interstellare genera delle onde d'urto misurabili grazie ad appositi satelliti posti in vicinanza della Terra, come ACE (*Advanced Composition Explorer*). Quando una CME viene emessa in corrispondenza del centro del Sole (quindi sul piano equatoriale e vicino al meridiano centrale), sembra circondare il disco occultatore del coronografo ed assume un aspetto ad alone diffuso a simmetria sferica (*Full Halo-CME*). Quando si manifesta con questa caratteristica, una CME è chiaramente emessa in "rotta di collisione" con la Terra.

Le CME sono caratterizzate da velocità, ampiezza angolare e posizione rispetto al centro del Sole (alcune possono essere descritte come *partial-halo* quando non hanno un'emissione spiccatamente centrale, ma sono inclinate di qualche decina di gradi rispetto al piano equatoriale). La massa totale di plasma espulsa in una CME varia da 10^{10} Kg a 10^{13} Kg mentre l'energia totale (cinetica più potenziale) varia da 10^{20} J a 10^{26} J, con valori medi di 1.4×10^{12} Kg e 2.6×10^{23} J rispettivamente.

Una CME è un evento che si origina sul Sole e segnatamente nella corona. La sua espansione verso l'esterno, attraverso lo spazio tra la stella ed il sistema solare (mezzo interplanetario) è spesso identificata come ICME (*Interplanetary Counterpart of CME*), la controparte interplanetaria di un'emissione di massa coronale. Detto in parole molto più semplici, una ICME è una CME che "viaggia" nello spazio e può essere diretta verso la Terra (esistono però anche le *reverse-ICME*, che si muovono dalla parte opposta al nostro pianeta). Infatti una ICME è quella che effettivamente può produrre, come vedremo nella sezione successiva, degli effetti geomagnetici anche rilevanti, se è sufficientemente densa, veloce ed associata ad una componente \mathbf{B}_z del campo IMF diretta verso il basso (*southward*) opposta alle linee di flusso del campo magnetico terrestre (campo geomagnetico). Eventi non molto frequenti ma sempre possibili.

Spesso una ICME si muove nel mezzo interplanetario ad una velocità maggiore di quella del vento solare lento emesso normalmente dal Sole. Questo genera un'onda d'urto del tipo *bow shock* o onda di prora, che "spingendo in avanti" le particelle le accelera fino a far loro raggiungere velocità molto alte, anche quasi relativistiche (cioè paragonabili a quella della luce entro qualche ordine di grandezza) le quali possono poi dare vita sulla Terra alle cosiddette tempeste di radiazione (termine un po' improprio come vedremo). L'alterazione, il disturbo del vento solare e del mezzo interplanetario in conseguenza dell'arrivo di un'onda d'urto associata ad una ICME veloce sono effetti piuttosto complicati da descrivere e sono illustrati schematicamente nelle figura 10 alla pagina seguente.

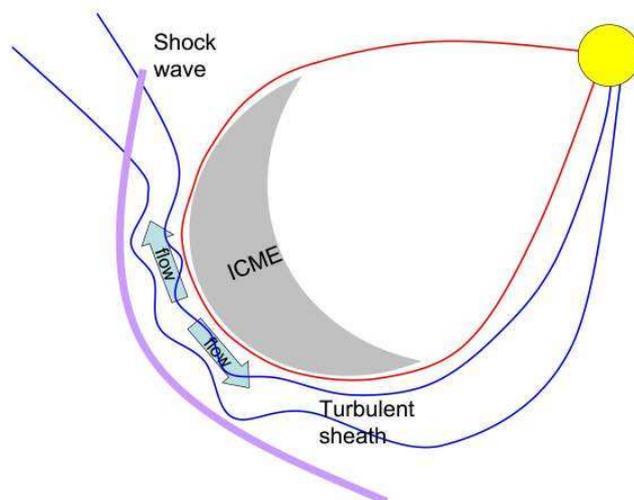


Fig. 10: disturbi prodotti dal transito di una ICME. Questa, se ha una velocità elevata, può produrre davanti a lei un'onda d'urto paragonabile (fatte le debite differenze) con quella prodotta dalla prua di una nave che si muove nell'acqua ad una velocità maggiore di questa. In figura la zona di mezzo interplanetario interessata dalla ICME è contornata dalla linea rossa; la zona grigia rappresenta la porzione di mezzo interstellare più densa associata alla ICME; la linea viola rappresenta l'onda d'urto di prua (bow-shock) e le linee blu irregolari delimitano la "turbulent sheath", che si può tradurre come "fodera di turbolenza": si tratta di una porzione di mezzo interplanetario dove le linee del campo magnetico interplanetario (IMF) hanno un andamento irregolare, con turbolenze in direzioni opposte indicate dalle frecce azzurre.

Con questo abbiamo terminato l'illustrazione di alcuni fenomeni rilevanti che si verificano sul Sole e che possono interessare lo *Space Weather*. Sono stati volutamente trascurati i flare (cosa non da poco), in quanto ampiamente illustrati in un altro lavoro che comunque viene allegato a questo come suo ideale completamento. Ora facciamo un salto di 1 UA e spostiamoci sulla Terra.

2) Dalla parte della Terra

Ionosfera e campo magnetico

L'atmosfera che circonda la Terra è un sistema alquanto complesso e non è compito facile quello di illustrarne le proprietà in modo dettagliato. Si tratta infatti di un mezzo dalle caratteristiche molto variabili, a seconda della distanza dalla superficie del pianeta, ma anche influenzato dalle stagioni, dall'attività dell'uomo e non per ultima dall'influenza del Sole e dei raggi cosmici, particelle estremamente energetiche che giungono fino a noi da tutte le parti dello spazio che ci circonda. Sono state avanzate teorie, sicuramente ben fondate ma ancora tutte da confermare, secondo le quali la densità dei raggi cosmici che raggiungono la Terra verrebbe influenzata dall'andamento dei cicli di attività solare, favorendo o inibendo, a seconda che ci si trovi nelle vicinanze di un minimo o di un massimo del ciclo la formazioni di nubi, con possibili ricadute sul clima della Terra non certo a breve termine ma per lo meno su una scala temporale abbastanza ampia. Oltretutto è tuttora aperto il dibattito fra due tendenze o scuole di pensiero, chiamiamole pure così, contrapposte: quella che attribuisce la causa dei grandi cambiamenti climatici sulla Terra principalmente alla presenza ed alle attività umane e quella che al contrario attribuisce la cosa a cause spaziali (come i cicli solari). In questa sede non possiamo addentrarci in una discussione di tale portata, per cui ci limitiamo allo studio delle parti dell'atmosfera terrestre che ci interessano, partendo dalla Figura 11:

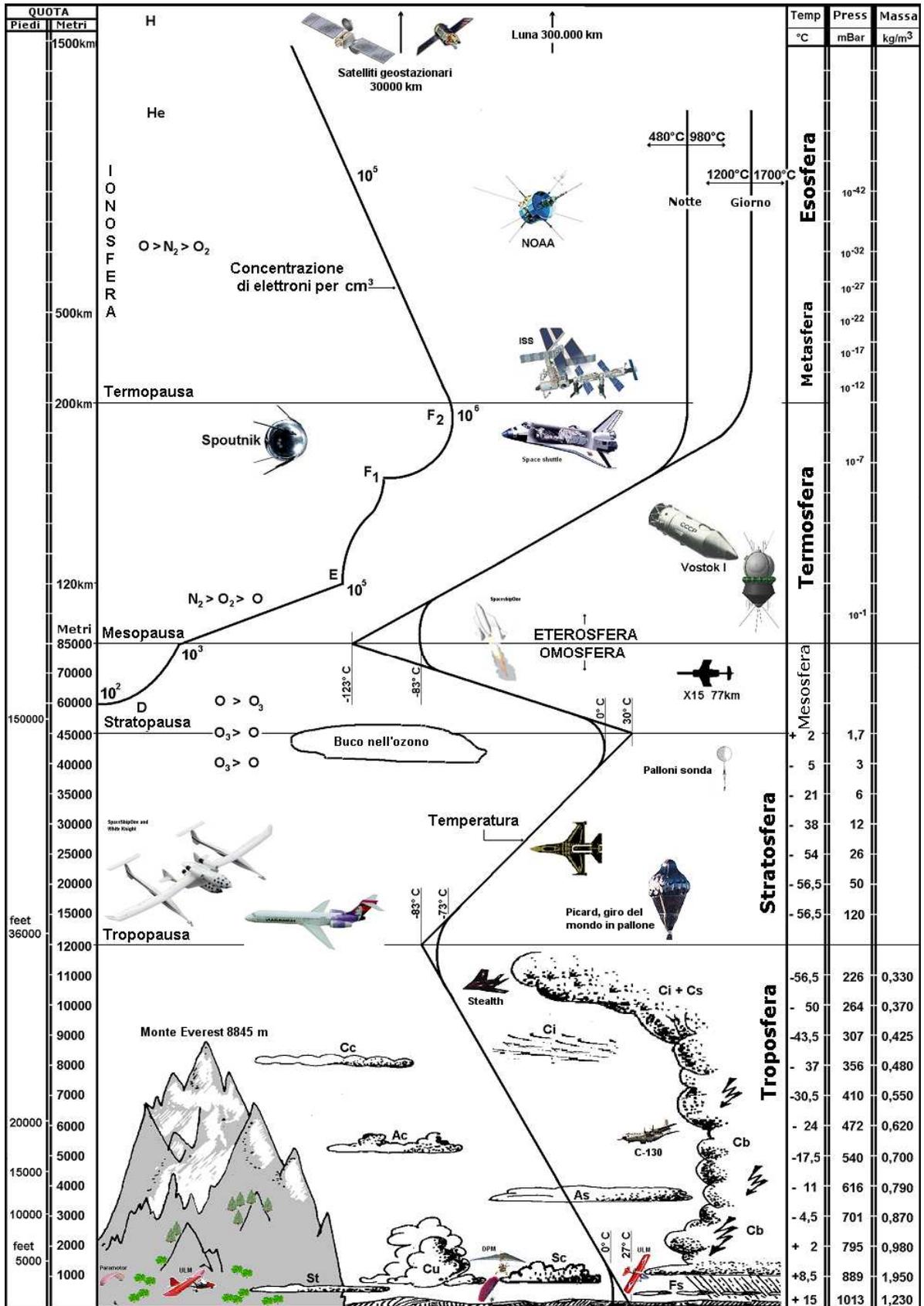


Fig. 11: rappresentazione schematica dell'atmosfera terrestre e delle parti nelle quali è convenzionalmente suddivisa. La ionosfera, che interessa nella nostra trattazione, comprende la Metasfera e la Esosfera. Sono riportate anche le scale di quota, pressione, temperatura e massa.

Di tutta questa baracca atmosferica a noi opportunisticamente interessa solo lo strato più lontano dal suolo: la ionosfera. Come dice il nome questa parte dell'atmosfera terrestre è composta da ioni ed assomiglia in tutto e per tutto, temperatura a parte, al plasma di cui è fatto il Sole, tanto che spesso ci si riferisce alla ionosfera come plasma ionosferico. La ionizzazione delle specie chimiche presenti in ionosfera è dovuta essenzialmente a due cause: la fotoionizzazione e la ionizzazione da impatto.

La prima è dovuta alla radiazione elettromagnetica proveniente normalmente dal Sole, che si accentua in casi particolari: Raggi X e Raggi UV favoriscono la formazioni di ioni a partire da specie neutre soprattutto durante il giorno e fino a latitudini sub-aurorali, cioè al di sotto delle latitudini alle quali vengono di norma osservate la aurore polari (si veda la sezione successiva dedicata agli effetti geomagnetici). La seconda causa è da imputare agli urti continui tra le specie chimiche originariamente neutre presenti nella ionosfera, ad esempio atomi H o molecole O₂ e particelle energetiche provenienti sempre del Sole o raggi cosmici dallo spazio. Questa ionizzazione è maggiore di notte e ad alte latitudini, visto che le particelle energetiche di origine solare vengono convogliate dal campo magnetico terrestre verso i poli magnetici, che non coincidono con quelli geografici ma distano di poco da loro. La ionosfera, che si ritiene si estenda tra i 60 Km e gli 800 Km dal suolo viene convenzionalmente divisa in strati o regioni:

- *Lo strato D* (tra i 60 ed i 90 Km dal suolo) dove le specie ionizzate dominanti sono NO⁺ e O₂⁺. Questo strato è presente solo di giorno.
- *Lo strato E* (tra 90 e 150 Km dal suolo), con le stesse specie ioniche dominanti dello strato precedente, che presenta un sottostrato con tempi di vita sporadici, chiamato E_s, attribuito all'arrivo di possibili sciame meteorici.
- *Lo strato F* (tra i 150 e gli 800 Km dal suolo), che possiede la maggior densità di plasma, stimata a 10⁶ particelle per cm³ durante il giorno, il quale viene suddiviso di giorno in due sottostrati: F1, con NO⁺ come specie ionizzata dominante e F2 con dominante O⁺.

La parte estrema della ionosfera, quindi l'alto strato F viene spesso chiamata *plasmassfera*.

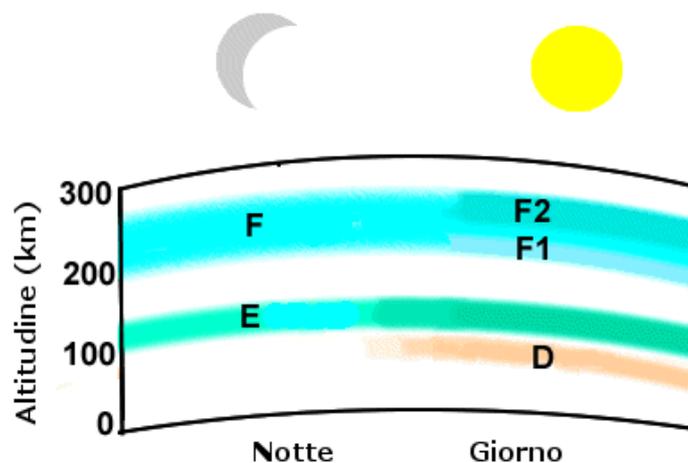


Fig. 12: strati di suddivisione convenzionale della ionosfera

La proprietà della ionosfera che ci interessa maggiormente è però la sua capacità di riflettere, in condizioni normali, totalmente le onde radio permettendo le trasmissioni radio da parte di una sorgente trasmittente ad una ricevente fuori portata ottica, cioè oltre l'orizzonte ottico, superando così il limite imposto dalla curvatura della Terra. Senza addentrarci in discorsi troppo complicati per i nostri scopi, ci basta sapere che questa proprietà della ionosfera interessa in modo differenziato gli strati nei quali abbiamo visto viene suddivisa la frequenza delle onde radio che possono essere riflesse (quindi dar luogo a trasmissioni) e che tutto questo può variare dal giorno alla notte ed è fortemente influenzabile dalle condizioni di attività del Sole.

Si può dimostrare che esiste una frequenza critica delle onde radio, che chiameremo f_c , esprimibile approssimativamente con la formula:

$$f_c \approx \sqrt{N}$$

dove N è la densità media dei portatori di carica del plasma ionosferico cioè il numero di cariche medio per unità di volume.

Questa frequenza critica di fatto divide il dominio delle altre frequenze in due parti:

- per frequenze inferiori alla frequenza critica si ha una incondizionata riflessione, qualunque sia l'angolo di incidenza dell'onda.
- per frequenze superiori alla frequenza critica, la riflessione avviene solamente sotto un certo angolo di incidenza, dipendente dalla frequenza ed in ogni caso mai per frequenze superiori a 3-3.5 volte la frequenza critica.

La frequenza f_c funziona quindi da separatore tra le onde che possono essere trasmesse utilmente e quelle che invece non sono riflesse dalla ionosfera, che si comporta per loro come un mezzo trasparente. Quanto affermato fin qui viene stravolto dall'arrivo di un vento solare particolarmente veloce, magari prodotto unitamente a ICMEs in direzione geoeffettiva (cioè dirette verso la Terra). In questi casi si possono instaurare diversi meccanismi di disturbo della ionosfera, tra i quali quello della cosiddetta riconnessione di carica fra gli elettroni trasportati dal vento solare e le specie ioniche positive presenti in ionosfera. Queste ultime possono venire neutralizzate dagli elettroni e quindi la densità dei portatori di carica N tende a diminuire, in quanto si formano in misura sempre maggior gli ENA (*electric neutral atoms*), o atomi elettricamente neutri, che non possono contribuire in quanto tali alla conduzione elettrica del plasma ionosferico. Come risultato, in prima approssimazione, visto che la frequenza critica f_c è proporzionale a N , la stessa tende a diminuire quindi si abbassa la soglia della capacità della ionosfera di riflettere totalmente le onde radio e, in ultima analisi, si abbassa la soglia della trasmissibilità in frequenza delle onde radio. Frequenze che prima potevano essere impiegate per la trasmissione ora possono essere completamente "accecate". E' questa una delle possibili cause dei black-out radio associati alle tempeste di radiazione prodotte dalla particelle energetiche provenienti dal Sole.

Va detto che quanto esposto qui è un modello estremamente semplice e che in effetti le cause che possono concorrere nella produzione di disturbi ionosferici sono molteplici e spesso interconnesse tra loro, ma la semplicità della nostra trattazione ci impedisce di approfondirle maggiormente. Ad esempio, come vedremo, l'azione del Sole può produrre addirittura la quasi completa neutralizzazione dello strato F della ionosfera con conseguenze facilmente immaginabili.

Passiamo ora al campo magnetico della Terra, limitatamente però a due soli suoi aspetti: una descrizione in termini di quelli che sono chiamati *elementi magnetici*, che ci tornerà utile in seguito e la descrizione della *magnetosfera*, zona di estensione del campo geomagnetico, dove con questo termine viene indicato il campo magnetico terrestre intorno al pianeta. La magnetosfera è fortemente influenzata dalla presenza del Sole e soprattutto dal continuo arrivo di vento solare.

Gli elementi magnetici sono una serie di vettori ed angoli che descrivono il campo geomagnetico in un punto arbitrario dello spazio in prossimità della Terra. Li illustriamo con la Figura 13:

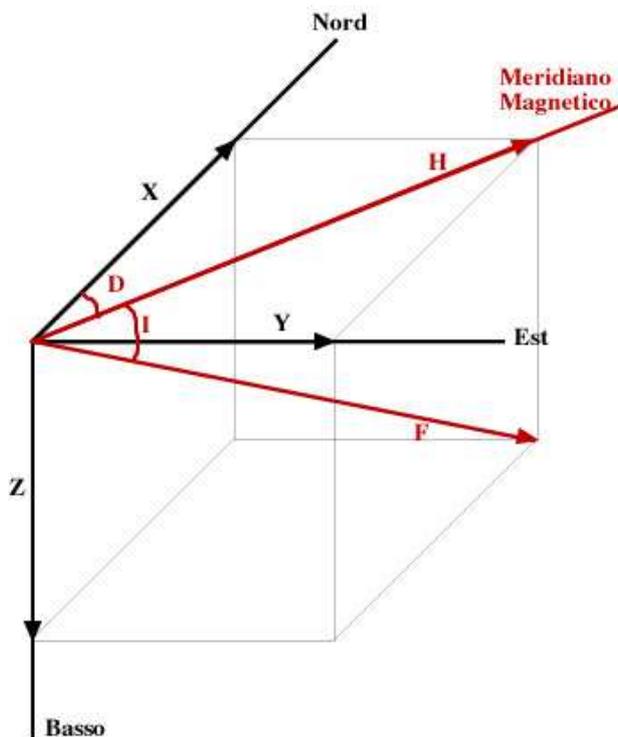


Fig. 13: rappresentazione del vettore campo magnetico terrestre F e dei suoi elementi X , Y , Z , D e I in una terna cartesiana avente origine in un punto sulla superficie terrestre, asse x diretto lungo il meridiano geografico (nel verso Sud-Nord), asse y lungo il parallelo geografico (Ovest-Est) e l'asse z lungo la verticale orientata verso il basso. Vengono così definiti gli elementi magnetici del campo magnetico terrestre. Si veda il testo in seguito.

Il campo magnetico è un campo vettoriale caratterizzato da un vettore, funzione del punto di osservazione e del tempo, che nel seguito chiameremo F ; introducendo una terna cartesiana con origine in O , luogo di osservazione, e assi x , y , z orientati come in figura, definiamo:

X = componente del vettore F nel piano orizzontale, diretta verso il Nord geografico;

Y = componente del vettore F nel piano orizzontale, diretta verso l'Est geografico;

Z = componente verticale del vettore F , assunta positiva quando è diretta verso l'interno della Terra;

H = componente orizzontale totale, di intensità pari alla radice quadrata della somma dei quadrati della componenti X ed Y

F = intensità totale del campo, data dalla radice quadrata della somma dei quadrati delle componenti X , Y e Z ;

D = declinazione magnetica, angolo tra la direzione di H e il meridiano geografico passante per il

punto in esame, assunto come positivo quando \mathbf{H} punta ad est del Nord geografico, dato da $\text{tang}^{-1}(Y/X)$;

I = inclinazione magnetica, angolo tra la direzione del vettore \mathbf{F} ed il piano orizzontale, dato da $\text{tang}^{-1}(Z/H)$ e assunto positivo quando \mathbf{F} è diretto verso l'interno della Terra.

Tutte le lettere in grassetto identificano grandezze vettoriali.

L'insieme $\mathbf{E}_m = \{\mathbf{F}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{H}, \mathbf{D}, I\}$ costituisce l'insieme dei cosiddetti *elementi magnetici* del campo magnetico terrestre in un punto arbitrario posto nelle vicinanze del pianeta. Vedremo in seguito che di tutti questi elementi quello che praticamente ha interesse nel contesto delle interazioni Sole-Terra è il vettore \mathbf{H} . Tutti gli altri elementi sono stati descritti per completezza di trattazione.

Per concludere questo argomento, occupiamoci ora dell'estensione nella spazio attorno alla Terra da parte del suo campo magnetico. Questo si estende in una zona ideale, detta *magnetosfera*, nella quale l'andamento delle linee di campo sarebbe del tutto simile, fatte le debite differenze, a quella di un magnete a sbarra con una semplice bipolarità, se la Terra fosse isolata nello spazio. L'arrivo del vento solare dal Sole determina però uno "schiacciamento" della magnetosfera dalla parte verso il Sole, con conseguente formazione di un'onda d'urto chiamata come al solito *bow shock* magnetosferico, mentre dalla parte opposta al Sole la magnetosfera assume una forma allungata, "stirata", chiamata coda magnetica o *magnetotail*. Anche nella magnetosfera esiste una zona di "fodera di turbolenza" (*magnetosheath*), tra il bow shock magnetosferico ed il confine ideale della magnetosfera dalla parte rivolta al Sole, chiamata *magnetopausa*. Questo modello del campo geomagnetico, illustrato parzialmente in figura 14, non è per nulla statico: può variare su una scala che va da alcune ore ad alcuni giorni e periodicamente segue gli andamenti dell'attività solare. Ovviamente eventi improvvisi e particolarmente energetici che si verificano sul Sole (flares, CMEs ecc.) possono influenzare in modo a volte drammatico la magnetosfera.

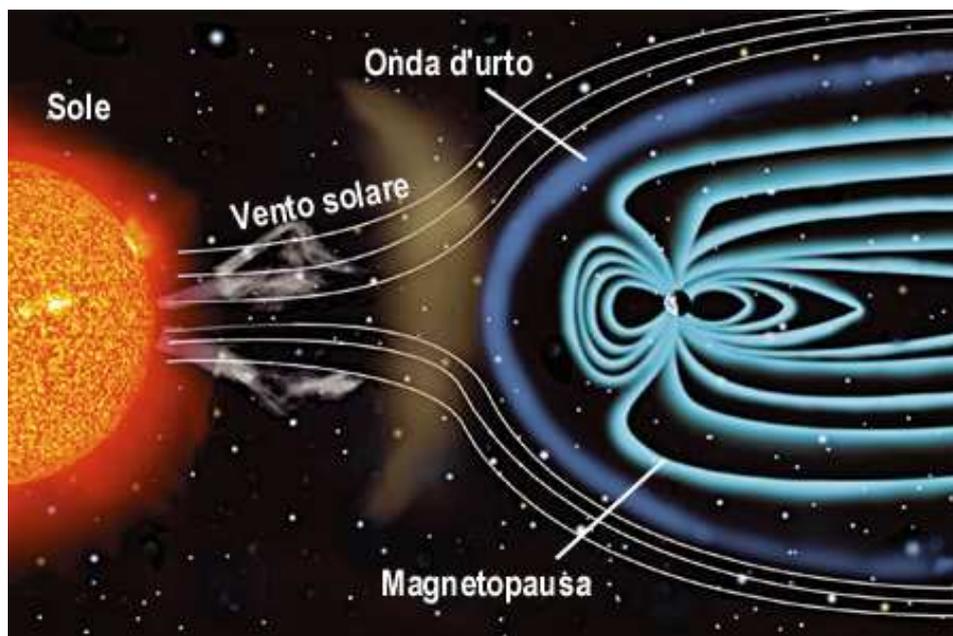


Fig. 14: la magnetosfera, la zona dello spazio intorno alla Terra influenzata dal suo campo magnetico. Notare l'asimmetria nella parte rivolta verso il Sole (sunward) dovuta all'azione del vento solare. In figura non è mostrata la coda magnetica (magnetotail), presente nella parte opposta al Sole.

L'estensione della magnetosfera va da una decina o poco più di Raggi Terrestri (un Raggio Terrestre è pari a circa 6370 Km) nella direzione verso il Sole, a diverse decine di Raggi Terrestri in direzione opposta, lungo la *magnetotail*. Tutto questo è riferito a condizioni di Sole quieto. Le perturbazioni prodotte da eventi solari possono far variare anche di molto queste scale di lunghezza.

3) Tempeste Solari

Il termine *Tempesta Solare* richiama immediatamente alla mente qualcosa di catastrofico che avviene sul Sole. Invece no. Il Sole ne è la causa, ma gli effetti sono qui da noi, sulla Terra. Per cui sarebbe meglio parlare di tempeste prodotte dal Sole, intendendoci subito bene che durante queste tempeste non piove acqua, caso mai piovono particelle e nemmeno tira vento, se si esclude quello solare. Quindi non serve un comune ombrello per difendersi, come durante un forte temporale. Un ombrello naturale la Terra lo ha e si chiama magnetosfera, solo che in alcuni casi non trattiene la pioggia e si fa spezzare dal vento. E allora arriva la “tempesta”. Poi di queste ce ne sono di diversi tipi: geomagnetiche, di radiazione, blackout radio. Quasi per consuetudine il termine tempesta però è associato di preferenza al primo tipo, che coinvolge in modo diretto il campo magnetico terrestre. E' bene mettere in chiaro subito una cosa: noi tratteremo qui in maniera per forza di cose semplice e schematica questi eventi, separandoli gli uni dagli altri, ma si deve sapere che molto spesso i loro effetti si presentano simultaneamente e non sempre è facile individuare quale causa ha prodotto ciò che è accaduto. Forse sarebbe meglio usare la terminologia inglese: *Space Weather Disturbances*, alterazioni dello *Space Weather*, per indicare questi fenomeni, ma “tempesta solare” è decisamente più accattivante e lo useremo anche noi, come quasi tutti del resto.

Tempeste geomagnetiche

Le tempeste geomagnetiche sono dovute a notevoli disturbi nella magnetosfera prodotti dal vento solare. Qualcuno potrebbe obiettare che il vento solare è continuamente emesso dal Sole, per cui la Terra dovrebbe essere sempre sottoposta a tempeste geomagnetiche. Invece quelle veramente tali si verificano ogni tanto, più spesso quando il Sole è vicino ai massimi di attività e, abbastanza curiosamente, le più intense sono invece più probabili quando la stella si trova in una fase discendente del ciclo, dopo il massimo verso il successivo minimo. In effetti il vento solare da solo non basta. Ci vogliono alcune condizioni, delle concause che si verificano tutte assieme, per avere degli effetti di una certa rilevanza. La “tempesta geomagnetica perfetta” dipende essenzialmente da quattro fattori:

1. Il vento solare deve raggiungere velocità elevate, anche oltre i 1000 Km/secondo
2. Il suo flusso deve essere direzionato in modo geoeffettivo, cioè deve essere distribuito con simmetria centrale rispetto alla Terra, in altre parole, deve essere in “rotta di collisione” con il nostro pianeta.
3. Deve avere densità, pressione e temperatura elevate.
4. La componente B_z del campo IMF deve essere negativa, cioè con un verso tale da opporsi a quello delle linee del campo geomagnetico (orientazione *southward*).

Una CME associata magari ad un flare di classe elevata (M o X) è sicuramente l'indiziata principale per produrre vento solare veloce, denso e caldo. Però deve essere ben direzionata: se emessa molto al di fuori del piano equatoriale del Sole ben difficilmente i suoi effetti potranno influenzare la Terra. Le origini dell'orientazione *southward* di B_z invece sono oggetto di studio e la trattazione qui

sarebbe troppo complicata. Certo è che non sempre la condizione 4 si verifica, pur in presenza delle prime tre e gli effetti finali sono conseguentemente ridotti. Per fare un esempio, il 15 febbraio 2011 alle ore 01:58 TU un intenso flare di classe X2.2 è stato emesso dalla regione attiva NOAA 11158, che si trovava in direzione geoeffettiva, essendo a bassa latitudine nell'emisfero S del Sole ed in prossimità del meridiano centrale. Circa due ore dopo due Full-Halo CMEs veloci (oltre i 1000 Km/sec) sono state lanciate dal Sole verso la Terra. Dopo due giorni circa gli effetti avrebbero dovuto manifestarsi sulla Terra, ma di fatto non è successo nulla o quasi, in quanto B_z si è mantenuta su valori positivi per tutto il tempo del viaggio delle ICMEs. Invece nel 1859 Richard Carrington osservò un brillamento (la controparte in luce visibile o in $H\alpha$ di un flare coronale) intenso e dopo pochi giorni sulla Terra successe di tutto, segno che le 4 condizioni entrarono tutte assieme a produrre una grande tempesta, probabilmente la più intensa mai osservata.

E' un po' come nelle malattie cardiovascolari: se uno è obeso, fuma, è stressato, iperteso ed ha la colesterolemia a livelli stellari è un candidato ideale al ricovero in unità coronarica. Basta che smetta di fumare ed il rischio diminuisce subito e non di poco. Se poi anche dimagrisce è meglio ancora.

Prima di passare a descrivere i possibili effetti di una tempesta geomagnetica cerchiamo di capire almeno a grandi linee come si genera: se il vento solare ha le giuste caratteristiche, è possibile che "buchi" la magnetosfera, passando attraverso la magnetopausa ed entrando nell'atmosfera terrestre nella parte cosiddetta ITM (ionosfera, termosfera, mesosfera) che abbiamo descritto nella sezione precedente. Qui gli ioni del vento solare interagiscono fortemente con il plasma ionosferico ed in particolare con la cosiddetta corrente ad anello equatoriale, prodotta da particelle cariche, principalmente elettroni del plasma, invorticati dalla Forza di Lorentz su una traiettoria praticamente circolare quasi nel piano equatoriale. Esiste un'ipotesi, detta della collisione con scambio di carica, secondo la quale l'aumento della concentrazione di ioni H^+ presenti nel vento solare passato al di qua della magnetopausa induce una progressiva neutralizzazione (per cattura) degli elettroni della corrente ad anello, con formazione di atomi di H neutri, gli ENA di cui si parlava prima. Quindi, in seguito ad una collisione, la carica di un elettrone passa sullo ione H^+ neutralizzandolo. La corrente ad anello a questo punto decade notevolmente di intensità, quindi varia e per induzione elettromagnetica produce un aumento della componente H del campo magnetico terrestre, che come abbiamo visto si trova proprio nel piano equatoriale. Questa variazione di campo magnetico produce a sua volta altre correnti indotte che possono manifestarsi anche al suolo e, come vedremo, provocare problemi anche notevoli alle linee elettriche civili.

Le ICMEs non sono le uniche possibili cause di tempesta geomagnetica. Anche i buchi coronali, che emettono vento solare veloce possono essere coinvolti, così come le CIR che abbiamo descritto prima. Esiste però una differenza sostanziale: essendo legati alla rotazione solare, buchi coronali e CIR producono quasi sempre tempeste ricorrenti, con una periodicità tipica del Sole, cioè quella di una rotazione di Carrington (circa 27,5 giorni). Queste tempeste ricorrenti difficilmente superano i gradi più bassi della scala in cui sono classificate e che vedremo più avanti. Le emissioni coronali di massa, che però non sempre sono associate a flare di classi energetiche elevate, sono quasi sempre le cause primarie delle tempeste più intense.

Ma cosa succede sulla Terra quando arriva una bella *geomagnetic storm*, come la chiamano gli anglosassoni? Qualcosa di sicuramente molto bello e qualcosa di potenzialmente molto pericoloso, sempre in rapporto con l'intensità del fenomeno. La cosa bella sono le aurore polari, prodotte dall'emissione di luce di colori diversi a seconda delle specie ioniche da parte del plasma ionosferico, quando entra in collisione con il plasma del vento solare. Sono visibili normalmente ad alte latitudini, anche se nelle tempeste più intense si manifestano a volte molto al di sotto dei poli (nel 1859 furono osservate addirittura ai tropici). Originano dai poli (quelli magnetici, non quelli geografici), sia a N che a S in quanto le particelle del vento solare, sia quelle che penetrano attraverso la magnetopausa dalla parte del Sole, sia quelle che vengono inizialmente convogliate dalla parte opposta e poi in un secondo tempo reincanalate verso la Terra in forza di un'onda d'urto secondaria prodotta da una riconnessione magnetica, vengono letteralmente trascinate lungo le linee del campo geomagnetico che com'è noto passano proprio dai poli magnetici terrestri, dove tra l'altro il campo è anche più intenso. Sono decisamente spettacolari:



Fig. 15: una splendida aurora polare. Le due tonalità di colore, il rosso ed il verde-azzurro sono prodotte dall'emissione di fotoni da parte di specie ioniche diverse del plasma ionosferico, in seguito agli urti con quelle del plasma del vento solare.

Chi non vorrebbe vedere almeno una volta una cosa così? Invece meglio non sperimentare gli effetti distruttivi delle tempeste magnetiche, che consistono nel possibile danneggiamento delle linee elettriche con conseguenti blackout, prodotto dalle correnti indotte al suolo dalle perturbazioni del campo magnetico. Se queste interessano centrali di trasformazione e di distribuzione la riparazione dei danni potrebbe richiedere molti giorni, forse addirittura mesi. I danni, di tutti i tipi ma soprattutto economici, sarebbero incalcolabili. Per non parlare del blocco dei rifornimenti (le pompe di benzina non vanno a carbone...), dei macchinari sanitari...Non ci vuole molta fantasia per arrivare a descrivere uno scenario che potrebbe davvero essere molto, molto serio. Chiaro quindi che si dovrebbe pensare a poter prevedere certi eventi e se possibile studiare un possibile piano di emergenza nel caso si verificano, ma di questo ci occuperemo nell'ultima sezione.

Vediamo qui invece come ci si può accorgere che una tempesta geomagnetica è già in corso e magari qualcuno se lo aspettava, visto che le famose condizioni da 1 a 4 viste prima si erano verificate negli ultimi due giorni dopo il lancio di una CME di quelle "giuste".

Esistono 13 Osservatori sparsi in tutto il mondo, alcuni ad alte latitudini (tra i 60° ed i 70°) altre a latitudini inferiori nei quali, con strumenti detti magnetografi, si misura lo scostamento (in nT) della componente **H** del campo geomagnetico dai suoi valori in situazione indisturbata. Ovviamente non

tutti gli Osservatori misurano le stesse variazioni di campo essendo posti a latitudini diverse, quindi per ognuno di loro esiste una scala di valori che va da 0 (campo indisturbato) a 9 (campo estremamente disturbato). I valori di questa scala dipendono dall'Osservatorio: se per esempio uno di questi misura uno scostamento dell'intensità di H dalla quiete pari a (per esempio) 120 nT, nello stesso tempo un altro può misurare un valore maggiore o minore. Tutti questi vengono poi correlati tra loro con opportuni valori di scala ed ogni 3 ore, quindi 8 volte al giorno, ogni Osservatorio calcola quello che si chiama Indice Geomagnetico, indicato con la lettera K. La media, calcolata sempre ogni 3 ore, dei 13 valori prodotti fornisce i cosiddetti *Indici Geomagnetici Planetari*, o K_p : si tratta perciò di 8 valori giornalieri, il primo relativo al periodo tra le h 00 e le h 03, il secondo tra le h 06 e le h 09 (tutte in TU) e così via.



Fig. 16: i 13 Osservatori impiegati per il calcolo degli Indici di Attività Geomagnetica (K_p)

K_p è il parametro utilizzato dal SWPC (*Space Weather Prediction Center*) del NOAA per classificare le tempeste geomagnetiche ed il loro possibile impatto sulla Terra, dalle aurore ai guasti delle linee elettriche o altro. Se K_p è compreso tra 0 e 3 si è in condizioni di quiete. Un valore di K_p pari a 4, magari della durata di più periodi sinottici (intesi come quelli di tre ore ciascuno) porta ad una situazione chiamata *unsettled* che letteralmente vuol dire agitato, sconvolto. Dal valore 5 in su si ha la condizione di *storm*: le tempeste sono classificate come G1 per K_p pari a 5, G2 per K_p pari a 6, G3 per K_p pari a 7, G4 per K_p pari a 8 e G5 per K_p pari a 9. La classificazione reale viene attribuita tenendo conto anche del fatto che un certo valore di K_p perduri per più di un periodo sinottico. Ogni grado (G sta chiaramente per Geomagnetic) è accompagnato da un descrittore: *minor, moderate, strong, severe e extreme*. Per informazioni dettagliate sui livelli, gli effetti prodotti e le frequenze di accadimento nell'arco di un ciclo solare si rimanda al sito del NOAA, segnalato nella sitografia finale, oppure al materiale cartaceo disponibile in Osservatorio.

Esiste anche un secondo indice, detto *indice A planetario*, i cui valori dipendono dalla scala di K_p suddivisa ulteriormente in 3 intervalli per ogni periodo sinottico, in modo da avere 24 valori

complessivi, chiamati indici a_k . L'indice A è la media giornaliera degli a_k . Poiché in questa sede sarebbe un po' troppo lungo illustrare tutte le correlazioni tra questi indici e tra i valori di A e le condizioni geomagnetiche, chi è interessato può trovare in Osservatorio o nei siti segnalati le informazioni necessarie.

Tempeste di radiazione

Ecco un altro esempio di un termine che va spiegato prima di intendere male le cose. In effetti anche il corrispondente inglese, *radiation storm*, ha lo stesso significato, ma alcuni autori preferiscono chiamare questi fenomeni SEP, che sta per *Solar Energetic Particles* o particelle energetiche solari. Chiaro quindi che in questo caso il termine radiazione non si riferisce alla luce, ma piuttosto al flusso di particelle (misurato in un'unità chiamata pfu o *particles flux unit*) segnatamente protoni ed elettroni emessi, irradiati appunto, dal Sole verso la Terra. Che poi gli effetti nocivi sia per certe tecnologie che per la salute umana siano più o meno gli stessi di quelli di una esposizione ad una vera radiazione ionizzante (come i Raggi X o gli UV estremi) giustifica forse l'utilizzo del termine. Va anche detto che queste particelle, di solito molto energetiche, al momento in cui collidono con l'atmosfera terrestre subiscono una brusca decelerazione, in conseguenza della quale vengono emessi dei fotoni X o UV. Non a caso questo fenomeno è conosciuto in fisica con un termine tedesco (sì, per una volta tanto niente inglese), detto *bremstrahlung*, che significa "radiazione di frenamento" e dovrebbe essere chiaro perché. Quindi a conti fatti sarebbe meglio parlare di tempeste di particelle, ma anche il termine tempeste di radiazione ci può stare. E infatti è comunemente usato.

Responsabili delle tempeste di radiazione sono quindi particelle molto energetiche in arrivo dal Sole. Sì, va bene, ma come partono di là? Due possibili cause, non escludendo che possano essercene altre: i flare e le onde d'urto associate alle ICMEs. Durante un flare infatti non viene emessa solo radiazione elettromagnetica, ma anche particelle di plasma a velocità a volte quasi relativistiche, in seguito alla riconnessione magnetica tra le linee di campo coronale ascendenti e discendenti in un tipico sistema a *loops*, caratteristico delle regioni bipolari. Anche il *bow-shock*, l'onda di prua che precede una ICME può spingere il plasma interplanetario più lento fino a raggiungere velocità e quindi energie cinetiche elevatissime. Questo cocktail di particelle cariche di alta energia può raggiungere la Terra anche in tempi brevissimi, dell'ordine di poche decine di minuti o qualche ora al massimo, a seconda della velocità. Questa è la prima grande differenza con le tempeste geomagnetiche viste prima, che essendo "portate" dalle ICMEs, hanno tempi di viaggio Sole-Terra dell'ordine di due o tre giorni.

L'altra grande (purtroppo) differenza con le geomagnetiche è che queste tempeste hanno dei potenziali rischi biologici, non per noi che stiamo tranquillamente seduti in casa davanti al pc o stiamo giocando a calcio con gli amici, ma per chi si trova ai limiti dell'atmosfera, come passeggeri ed equipaggi di voli aerei ad alta quota su rotte polari o addirittura al di fuori di essa e oltre la magnetosfera, come gli astronauti impegnati in EVA (*Extra-Vehicular Activities*), le "passeggiate spaziali", magari necessarie per riparare un componente guasto di un modulo di una stazione orbitante o di un satellite. Poi ci sono effetti elettromagnetici: l'energia trasportata dalle SEP può danneggiare anche seriamente i circuiti dei satelliti in orbita alta con conseguenti ripercussioni sulle loro trasmissioni. Anche per le tempeste di radiazione esistono i gradi di intensità: in questo caso vanno da S1 a S5, con i consueti descrittori da *minor* a *extreme* e ciò che li determina sono i valori

dei flussi delle SEP a varie energie: maggiori di 1, 10 o 100 MeV per i protoni, maggiori di 1 o 2 MeV per gli elettroni del plasma interplanetario. Quando queste energie superano delle soglie prefissate scattano i vari gradi S (che sta per Solar Particles). Anche in questo caso si rimanda al sito SWPC-NOAA per l'illustrazione dettagliata dei livelli, delle soglie energetiche e degli effetti prodotti, oltre che delle frequenze di accadimento in rapporto al periodo del ciclo solare. Materiale cartaceo illustrativo è inoltre disponibile in Osservatorio.

Blackout Radio

Ed eccoci alla terza tipologia di disturbi dello *Space Weather*, questa volta associata a quei fenomeni transitori, di breve durata, estremamente energetici conosciuti come flare solari. Esistono anche le tempeste radio, ma quelle sono un'altra cosa ancora e ne parleremo brevemente nella prossima sezione. I flare sono sorgenti di radiazione elettromagnetica e liberano tanta di quella energia in un secondo che sarebbe sufficiente per mandare avanti tutto il nostro pianeta per anni. Tutta energia perduta e inutilizzata. E dannosa per noi, per di più. Durante un flare vengono emesse radiazioni elettromagnetiche in modo più intenso e rapido nei Raggi X duri, cioè con lunghezze d'onda comprese tra 1Å e 10Å e particelle quasi - relativistiche, cioè con velocità non lontane da quelle della luce, pertanto molto energetiche. La radiazione giunge sulla Terra in 8 minuti, le particelle più veloci dopo una ventina di minuti circa dal picco del flare. L'effetto combinato delle due è uno stravolgimento chimico-fisico della ionosfera, con formazione di ENA per ricombinazione di carica e riscaldamento complessivo della zona ITM dovuto principalmente alla radiazione elettromagnetica, che provoca inoltre variazioni nella frequenza critica per la riflessione totale delle onde radio di cui si è parlato prima. Tutto questo può comportare diversi effetti, che vanno da piccole interruzioni delle comunicazioni radio soprattutto nelle alte frequenze (HF), fino in certi casi estremi alla quasi completa neutralizzazione dello strato F della ionosfera. Dato che molti sistemi di comunicazione utilizzano le proprietà riflettenti della ionosfera per le onde radio in modo da poter trasmettere segnali a grande distanza, i disturbi ionosferici conseguenti all'arrivo della radiazione emessa da un flare intenso possono influenzare le trasmissioni a tutte le latitudini. Alcune frequenze sono assorbite ed altre riflesse ed i segnali subiscono fluttuazioni rapide e vengono diretti lungo traiettorie imprevedibili. Le trasmissioni televisive e radiofoniche commerciali sono influenzate molto poco da questi disturbi, per il tipo di frequenze che usano: quelli che ne risentono maggiormente sono probabilmente i radioamatori e non bisogna trascurare l'effetto possibile sui sistemi di navigazione satellitare, come il GPS.

Sono possibili anche effetti sui satelliti, che per colpa dell'espansione dell'alta ionosfera dovuta al riscaldamento, con conseguente diminuzione della densità della plasmasfera, possono letteralmente "perdere l'orbita" fino a ridurla al punto tale da precipitare verso la Terra. Un esempio di una navicella spaziale rientrata prematuramente nella bassa atmosfera è offerto dallo Skylab, in seguito ad un inaspettato incremento dell'attività solare in corona. Durante le grandi tempeste del 1989, quattro satelliti della marina militare statunitense sono rimasti fuori posizione (e fuori uso) per più di una settimana.

I blackout radio sono quindi associati ai flare, ed anch'essi sono suddivisi in cinque livelli di importanza, da R1 (*minor*) a R5 (*extreme*) a seconda della classe energetica del flare associato. Per esempio, un blackout di livello R5 è prodotto da un flare di classe X10 o superiore, con effetti a dir poco devastanti. Per fortuna che l'incidenza media di questi fenomeni è minore di una per ogni

ciclo solare. Il flare più intenso mai registrato è stato un X28 il 4 Novembre 2003 (Figura 17). Fortunatamente è stato emesso in prossimità del lembo occidentale del Sole, quindi in direzione non geoeffettiva. E' stato accompagnato da una delle CME più impressionanti che si ricordino, ma gli effetti sul nostro pianeta sono stati modesti. Vengono un po' i brividi a pensare cosa sarebbe accaduto se questo evento fosse successo solo una settimana prima, quando la regione attiva che ha emesso il flare si trovava in prossimità del meridiano centrale, in piena rotta di collisione con la Terra. Fin'ora ce la siamo cavata, ma fino a quando? Riprenderemo l'argomento nell'ultima sezione a proposito delle previsioni dello *Space Weather*.

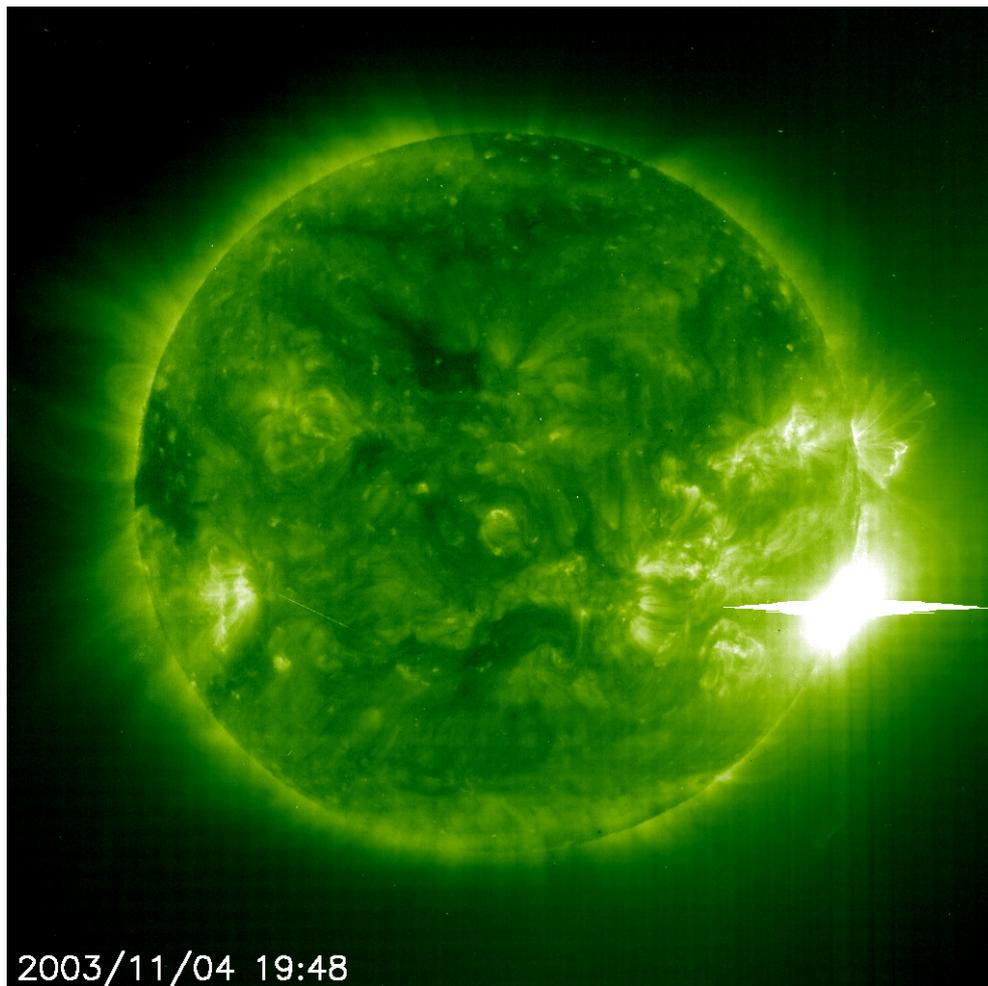


Fig. 17: impressionante flare di classe X28 ripreso dal telescopio EIT a bordo della sonda SOHO alla frequenza di 195Å, nell'ultravioletto estremo. Eventi come questo, con le giuste caratteristiche di direzionalità, possono provocare blackout radio di portata estrema, in grado di produrre danni incalcolabili per l'attività umana.

Come per le tempeste geomagnetiche e le SEP anche per i blackout radio si rimanda al sito NOAA-SWPC (o alla documentazione disponibile in Osservatorio) per una descrizione dettagliata dei livelli di intensità dei radio-blackout e degli effetti che possono interessare le comunicazioni. Il documento ufficiale del NOAA relativo alla classificazione di tutti i disturbi dello *Space Weather* è comunque allegato a questi appunti. Prima di passare all'argomento successivo, l'emissione radio da parte del Sole, da non confondere con i blackout radio, è forse opportuno schematizzare in una tabella (alla pagina seguente) quanto detto fin qui:

Tipo di disturbo	Possibili cause	Effetti principali	Classificazione NOAA	Riferimento
Tempesta Geomagnetica	Aumento di velocità, densità e temperatura del vento solare in seguito a CMEs o per emissione di vento solare veloce da parte di buchi coronali . Presenza di regioni corotanti (CIRs) per le tempeste ricorrenti con periodicità tipica solare di 27 giorni	Aurore polari principalmente ad alte latitudini, che possono essere osservate anche a latitudini più basse in corrispondenza di tempeste molto intense. Produzioni di forti correnti indotte al suolo che possono danneggiare le linee elettriche, i trasformatori e le centrali di distribuzione, le condutture dei gasdotti e degli oleodotti, le dorsali in fibra ottica.	G1 (minor) G2 (moderate) G3 (strong) G4 (severe) G5 (extreme)	Indici geomagnetici planetari K_p uguali o maggiori di 5
Tempesta di Radiazione o SEP	Particelle quasi relativistiche emesse da un flare intenso o accelerate nel vento solare in seguito ad un bow-shock di una ICME	Danni biologici per astronauti in attività extraveicolare, per i passeggeri e gli equipaggi di voli ad alta quota su rotte polari, disturbi nelle trasmissioni satellitari.	S1 (minor) S2 (moderate) S3 (strong) S4 (severe) S5 (extreme)	Superamento della soglia di quiete nei flussi di protoni con energie maggiori o uguali a 10 MeV e di elettroni con energie maggiori o uguali a 1 MeV
Radio Blackouts	Flare solari di classi maggiori uguali o maggiori di M1	Interruzioni da sporadiche a persistenti nelle comunicazioni radio alle alte frequenze. Disturbi ai sistemi di navigazione satellitare ed ai rivelatori radar al suolo.	R1 (minor) R2 (moderate) R3 (strong) R4 (severe) R5 (extreme)	Potenza emessa da un flare, secondo le classi energetiche, da M1 fino a quelle superiori a X10

Tabella 1: i disturbi dello Space Weather.

4) Onde Radio dal Sole

La Radioastronomia solare è una scienza molto giovane (esiste da meno di 70 anni) e, come molte altre cose di rilevante importanza scientifica, fu scoperta per caso. Nel Febbraio del 1942 era in pieno svolgimento la “Battaglia d’Inghilterra”, la potente offensiva aerea scagliata dal III Reich contro gli Inglesi con bombardamenti a tappeto sulle principali città britanniche (da Londra a Coventry, che fu praticamente annientata con bombardamenti sistematici in quanto la Luftwaffe pensava che lì si trovassero i depositi e le basi principali della RAF, tanto che fu coniato il verbo “coventrizzare” per indicare la distruzione programmata, sistematica e quasi scientifica di qualcosa). Anche se poi le sorti di questa grande battaglia dei cieli furono infine favorevoli agli inglesi, si può immaginare con quale “*british surprise*” si risvegliarono la mattina del 12 Febbraio ritrovandosi due navi da guerra tedesche, la *Scharnhorst* e la *Gneisenau*, nel bel mezzo del Canale della Manica, pronte a fare da appoggio alle incursioni aeree dell’aviazione germanica. La prima domanda degli inglesi fu quasi ovvia: come diavolo sono arrivate qui quelle? Perché i nostri Radar, che scandagliano ininterrottamente l’*English Channel* non le hanno viste? I Radar inglesi operavano su una lunghezza d’onda radio di 5 metri ed il primo pensiero che passò per la testa del *British War Office*, l’Ufficio per la Guerra, fu quella che i tedeschi avessero escogitato qualche diavoleria tecnologica in grado di “accecare” i loro Radar. Incaricarono allora l’*Army Operational Research Group*, del quale faceva parte il giovane fisico civile Stanley Hey, di analizzare il problema per trovare alla svelta rapide ed efficaci contromisure, visto che con quelli dell’altra parte c’era poco da scherzare a quei tempi. Hey piazzò immediatamente delle stazioni di monitoraggio sulle scogliere di Dover, puntando i suoi rivelatori di onde radio verso la parte opposta della Manica, la Francia allora occupata dai tedeschi. Il 27 ed il 28 Febbraio si accorse che i radar antiaerei, durante il giorno, erano stati resi inutilizzabili da un rumore radio statico ed insolitamente forte proveniente da est, scatenando giustificate preoccupazioni nell’Ufficio per la Guerra relative al fatto che i tedeschi stavano probabilmente progettando un’incursione aerea di notevole portata. Quando si accorse che il massimo dei disturbi di interferenza radio provenivano dalla direzione in cui si trovava il Sole (ad est appunto rispetto alla sponda inglese della Manica), Hey interpellò il Royal Greenwich Observatory scoprendo che in quei giorni un gruppo di macchie solari di dimensioni eccezionali era in transito sul disco solare. Nonostante lo scetticismo dei suoi colleghi (eufemismo inglese per dire che fu preso per matto o quasi), Hey concluse che l’acceccamento dei Radar non era prodotto da un intervento umano, ma era da imputare al Sole. Un eccellente esempio di “*serendipity*”, termine inglese intraducibile, che vuol dire più o meno *come scoprire una cosa andando alla ricerca di un’altra*. Da allora lo studio dello spettro radio emesso dalla stella si è evoluto ed ha fatto passi enormi, grazie anche all’impiego di radiotelescopi sempre più sofisticati ed ora noi andiamo ad illustrare brevemente e schematicamente il nostro “radiosole”.

L’emissione radio da parte del Sole al minimo di attività, detta di Sole quieto, è divisa in due componenti: un’emissione di fondo stazionaria che rimane a livelli costanti per periodi di mesi o addirittura anni ed una componente lentamente variabile, detta componente S, che cambia da un giorno all’altro e mostra una periodicità tipica del Sole, di 27 giorni. L’emissione di fondo (*background component*) è generata nell’atmosfera della stella da elettroni di alta energia termica le cui velocità aumentano quando incontrano ioni carichi positivamente (effetto chiamato interazione elettrone libero-ione libero o *free-free transition*). La componente S si genera invece al di sopra delle regioni attive cromosferiche, le *plages* che quasi sempre presentano le macchie come

controparte in fotosfera, per effetto di *bremstrahlung* o per *radiazione giromagnetica*, un processo nel quale gli elettroni di alta energia emettono fotoni quando entrano in traiettorie a spirale in presenza di un forte campo magnetico. Fu quasi certamente un aumento nell'emissione radio associato al grande gruppo di macchie presente sul disco che permise a Hey nel 1942 di rilevare i segnali che diedero vita alla radioastronomia solare.

Quando il Sole è disturbato da flare o CME allora le cose cambiano drasticamente: questi eventi producono onde radio che coprono un intervallo di frequenze molto ampio, da alcune decine di KHz fino a decine o addirittura centinaia di GHz. Pochi secondi dopo l'emissione di un flare, fasci di elettroni sono emessi dalla corona a velocità superiori all'80% di quella della luce. Questo fascio di particelle energetiche interagisce con gli altri elettroni e ioni del plasma coronale, generando ed amplificando onde di plasma che sono poi parzialmente convertite in onde elettromagnetiche a banda stretta udibili da radio ricevitori. Queste emissioni radio, che durano pochi secondi, sono dette "radio burst di tipo III" e presentano la caratteristica di uno spostamento in frequenza (in inglese *drift frequency* o *radio sweep*) di circa 20 MHz per secondo mano a mano che il fascio di elettroni energetici che le generano risale verso gli strati più esterni della corona.

Nel caso di flare di classi energetiche elevate, le onde d'urto coronali delle CME che possono essere loro associate forzano il plasma coronale ed il campo magnetico ad oscillare producendo le tipiche onde di Alfvén (di cui si è parlato nella sezione 2), che raggiungendo velocità supersoniche relativamente al plasma coronale innescano emissioni radio con minore deriva in frequenza e di durata maggiore, al massimo di qualche minuto. Queste sono dette "radio burst di tipo II".

I radio burst di tipo IV sono invece prodotti da elettroni coronali relativistici intrappolati in nubi di plasma emessi dalla corona sedi di forti campi magnetici. La loro durata varia da diversi minuti a qualche ora.

Esistono infine i burst di tipo I, detti *storm burst* o tempeste radio, associati alla componente S e tipicamente alla sua emissione ad una frequenza tipica pari a 245 MHz ed infine quelli di tipo V, sui quali però non ci soffermiamo. Quelli di maggiore interesse per lo *Space Weather* sono i burst radio di tipo II e IV perché la loro presenza può essere il sintomo dell'arrivo di vento solare veloce da parte di una CME o di radiazione e SEP da parte di un flare di classe energetica elevata. Ecco perché sono loro ad essere quelli costantemente monitorati, anche nel Sun Daily Book del nostro Osservatorio.

Un discorso a parte merita il cosiddetto radio flusso alla lunghezza d'onda di 10.7 cm. Questa emissione radio da parte del Sole, corrispondente ad una frequenza di 2.8 GHz, viene usata come parametro per descrivere l'andamento di un ciclo solare, in quanto segue quasi di pari passo le variazioni del numero di Wolf, con la differenza però che mentre quest'ultimo può raggiungere il valore 0 e mantenerlo anche per giorni, settimane e addirittura mesi durante i minimi, il radio flusso a 10.7 cm. non scende mai sotto un valore minimo di circa 68, misurato in una unità particolare chiamata sfu (*solar flux unit*, pari a $10^{-22} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$). Esiste anche un'altra unità di misura, detta Jansky: 1 sfu è pari a 10.000 Jansky). Il radio flusso a 10.7 cm. è misurato ufficialmente tre volte al giorno, alle 17:00 TU, 20:00 TU e 23:00 TU dall'Osservatorio DRAO (*Dominion Radio Astrophysical Observatory*) di Penticton nel Canada settentrionale, che è la stazione di riferimento

mondiale per questo tipo di misure. Le due figure seguenti illustrano la correlazione tra il radio flusso a 10.7 cm. ed i numeri di Wolf normalizzati dal SIDC.

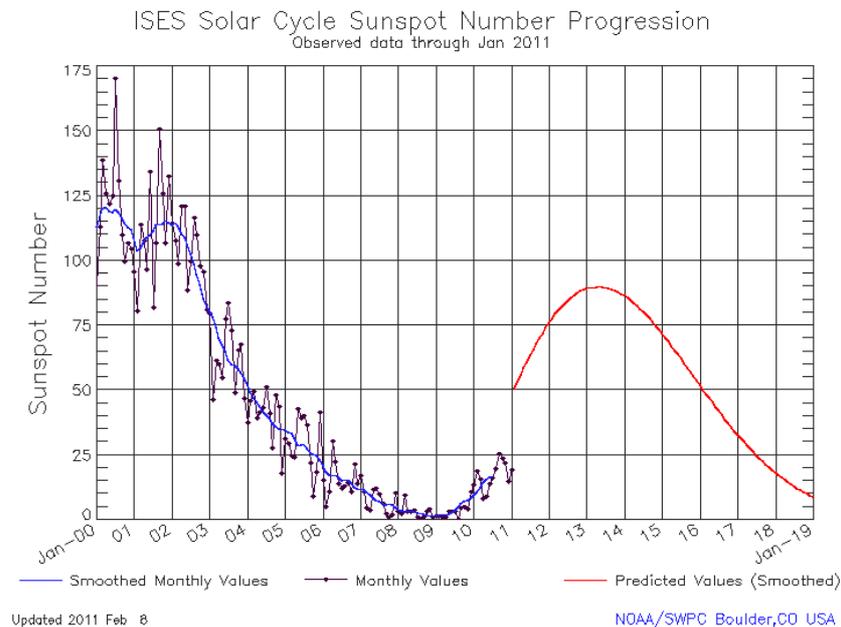


Fig. 18: *L'andamento dei Numeri di Wolf normalizzati dal massimo del ciclo 23 (linea azzurra) e l'andamento previsionale per il ciclo 24 dal 2011 in poi (linea rossa)*

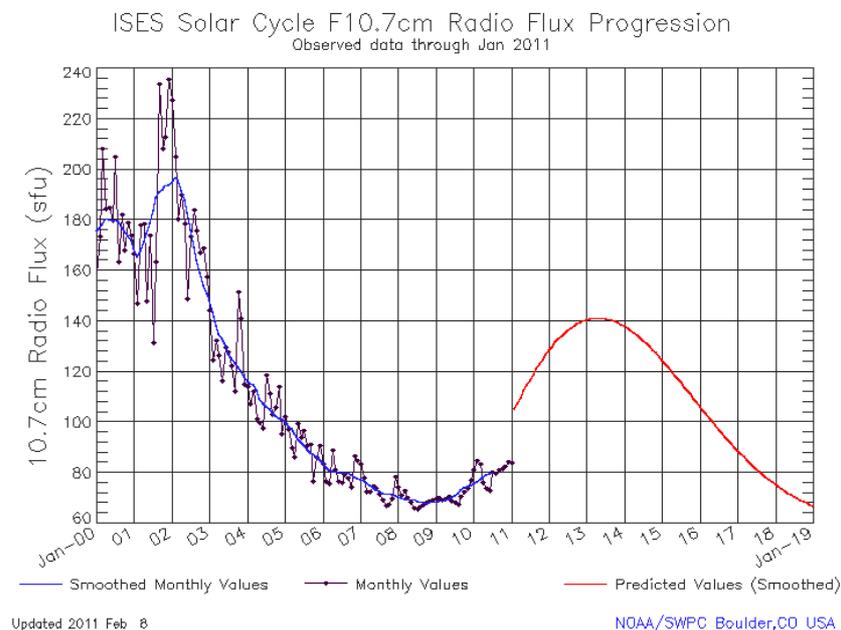


Fig. 19: *andamento del radio flusso a 10.7 cm (in unità sfu) nello stesso intervallo temporale della figura precedente e la relativa previsione per il ciclo in corso dopo il 2011 (linea rossa). La correlazione tra i due andamenti è evidente.*

Per molti autori, il radio flusso a 10.7 cm. fornisce una stima ancora più attendibile dell'andamento di un ciclo solare, in quanto non risente della discrezionalità di un osservatore, come il numero di Wolf, essendo un dato diretto proveniente dal Sole e misurato automaticamente. Per di più è rilevabile con qualsiasi condizione meteorologica e non è affetto da variazioni nel seeing. In ogni caso il suo confronto con i numeri di Wolf è impiegato da molti ricercatori, soprattutto quelli che

studiano l'andamento dei cicli nel passato e le previsioni di quelli successivi. Per finire, come per le tempeste solari, una tabella riassuntiva dei principali tipi di emissione del radiosole (i burst):

Tipo	Durata	Sorgente	Processo/i	Ampiezza di banda	Spostamento in frequenza
I (storm)	minuti, ore	componente S, fase estesa di un flare	bremsstrahlung, radiazione giromagnetica	continuo	nessuno
II	minuti	fase estesa di un flare, CMEs	onde di Alfvén	50 MHz	20 MHz/min
III	secondi	fase impulsiva di un flare	onde di plasma coronale	5 MHz	20 MHz/sec
IV	minuti, ore	fase estesa di un flare	radiazione giromagnetica	continuo	nessuno

Tabella 2: i principali tipi di radioburst e le loro caratteristiche in frequenza, più le cause ed i processi che si ritiene siano responsabili di questi eventi. L'ampiezza di banda si riferisce all'intervallo di frequenza emesse, per esempio entro i 50 MHz in un burst di tipo II; il termine continuo indica che il burst non implica emissione in un intervallo limitato di frequenze, ma in tutto il dominio delle onde radio. Per il significato di tutti gli altri termini si veda il testo.

5) Che tempo farà?

La necessità e le possibilità di prevedere i disturbi dello Space Weather

Fenomeni di disturbo molto intensi dello *Space Weather* possono essere deleteri per la tecnologia, l'attività umana, l'economia e la salute. Se fosse possibile prevedere quando e a quali latitudini potrebbe presentarsi una tempesta geomagnetica, quando un blackout radio potrebbe disturbare i sistemi di navigazione, o quando una tempesta di radiazione potrebbe investire degli astronauti impegnati in missioni spaziali (anche il futuro ipotetico viaggio verso Marte, vista la sua durata, sarebbe molto a rischio da questo punto di vista) è una questione di importanza vitale sotto parecchi punti di vista. La Terra e l'umanità hanno sempre convissuto con questi fenomeni e continuano a farlo. Solo che la dipendenza dell'uomo dalla propria tecnologia si è fatta ormai molto più stretta, molto più di quanto lo era in passato ed ecco che l'umanità, di fronte alle bizzarrie di un Sole arrabbiato potrebbe di certo correre oggi dei rischi molto più seri. La nostra conoscenza (e consapevolezza) delle vulnerabilità delle moderne infrastrutture in caso di severi disturbi provenienti dal Sole e la necessità di sviluppare possibili contromisure volte a ridurre i rischi connessi si basano in massima parte su due soli eventi: le tempeste geomagnetiche del Marzo 1989 e di Ottobre-Novembre 2003 (la *Halloween Storm*), che sono state quelle di maggiore intensità che si sono presentate dopo che la fisica solare ha cominciato a fare luce su questi fenomeni. Le "supertempeste" del 1859 e del 1921 però ci ricordano che tali eventi, sebbene rari, si ripeteranno sicuramente in futuro. L'intenso flare e la CME che hanno prodotto la tempesta del 2003 si sono verificati in prossimità del lembo solare e perciò non hanno investito direttamente la Terra. Se fossero avvenuti ad una longitudine più centrale probabilmente avremmo sperimentato degli effetti simili a quelli del 1859. Con quali conseguenze? Per darne un'idea, sono stati stimati i costi dei danni prodotti solo negli Stati Uniti da un blackout radio nell'Agosto del 2003: da 4 a 10 miliardi di dollari. E' stato anche ipotizzato che

uno scenario di evento geomagnetico di grado severo o estremo (G4-G5) comporterebbe costi attorno agli 1-2 trilioni (migliaia di miliardi) di dollari in un anno, con tempi di ripristino completo dei danni prodotti stimato dai 4 ai 10 anni. C'è poco da stare allegri. Soprattutto per le casse degli Stati. Tutti sono a rischio, non solo gli Stati Uniti. Anche noi Italiani.

Una possibile soluzione al problema delle contromisure sarebbe quella di adottare un protocollo di intesa tra tutti gli Stati della Terra, con indicazioni chiare e precise su cosa fare e chi deve farlo in caso di arrivo di forti perturbazioni, unitamente a dei congrui stanziamenti per la ricerca in questo settore, in modo da poter prevedere con tempi sempre più brevi le scalmane del Sole. Ma gli Stati della Terra sono sicuramente in altre faccende affaccendati, come le guerre tanto per dirne una, per pensare allo *Space Weather*. Ma che cavolo sarà mai e, soprattutto, chi se ne frega? Salvo poi pentirsene quando la frittata sarà fatta. Lasciando da parte questi discorsi (purtroppo) utopistici, torniamo con i piedi per terra e cerchiamo di capire a che punto siamo ora, con le possibili previsioni del tempo che farà. Dalla semplice osservazione del Sole è attualmente impossibile rilevare sia la velocità del vento solare nello spazio interplanetario in prossimità del Sole, sia le proprietà nei pressi della corona del campo IMF e quindi l'intensità ed il verso della sua componente B_z e per quanto tempo potrebbe rimanere in orientazione *southward*, che come abbiamo visto è uno degli ingredienti di base nella ricetta delle tempeste magnetiche perfette. Le nostre prime informazioni provengono da zone molto (troppo) più vicine alla Terra di quanto lo sia il Sole: i dettagli dei disturbi magnetici sono rilevabili solo quando una ICME transita al di qua di L1, il primo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole che si trova a 220 raggi terrestri da noi (1.500.000 Km) in direzione del Sole. Attorno a questo punto sono infatti state collocate in orbita diverse "sentinelle del Sole" (tipicamente SOHO e ACE) che possono inviare a Terra informazioni dettagliate della tempesta in arrivo. Ma potrebbe essere troppo tardi. Anche gli indici geomagnetici, descritti prima, ci fanno capire chiaramente che una tempesta geomagnetica può già essere in corso, ma non sono in grado di prevederla. E' come guardar fuori dalla finestra, vedere che piove e dire "prevedo che piovierà".

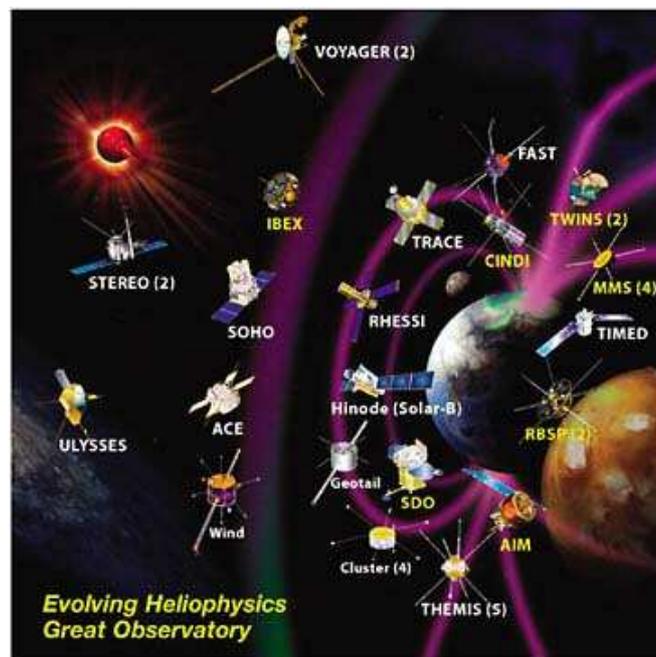


Fig. 20: le "sentinelle del Sole"

Per quanto riguarda gli altri effetti correlati con le SEP ed i blackout radio, i tempi che intercorrono tra l'evento solare e le conseguenze sulla Terra sono brevissimi, come abbiamo visto, il che rende impossibile al momento prevedere questi fenomeni e soprattutto adottare delle valide contromisure. Nonostante tutto, nessuno perde coraggio e la ricerca continua, grazie principalmente all'utilizzo sempre più massiccio di rivelatori dei disturbi dello *Space Weather* che operano nello spazio, come i satelliti GOES e POES ed altri ancora. Molti Paesi del mondo, per fortuna, hanno avviato dei programmi di collaborazione scientifica per poter arrivare, si spera tra non molto, a tempi di possibile previsione degli eventi con un anticipo di almeno due settimane. E' fantascienza? Per il momento non lo sappiamo, possiamo solo aspettare e sperare che nel frattempo la nostra stella non ci mandi dei calorosi messaggi per ricordarci che chi comanda, dalle parti della Terra, è lei, non noi.

Siamo così giunti alla fine del nostro lungo viaggio nello *Space Weather*. Grazie per avermi seguito fin qui. Seguono alcune appendici: una bibliografia e sitografia, le origini dei dati usati nella compilazione del nostro Solar Daily Book, un glossario dei termini più comuni relativi al sistema Sole-Terra, la classificazione del NOAA degli eventi SW, una breve descrizione dei telescopi usati in Osservatorio e, come allegato, un articolo sui flare pubblicato a cura dell'autore sulla rivista "Meridiana" N° 209 di Settembre-Ottobre 2010.

Bibliografia

Un buon testo introduttivo e semplice sul Sole, che però non tratta i temi dello Space Weather. Utile comunque perché spiega con molta chiarezza la struttura delle stella, come osservarla sia in luce bianca che monocromatica e come si possono fare delle buone foto al Sole:

- **Come si osserva il Sole. Metodi e tecniche per l'astronomo non professionista**

Jamey L. Jenkins

Springer 2009

Un ottimo testo di fisica solare (forse l'unico in italiano), in cui la trattazione è rigorosa e fa uso di un certo formalismo matematico. E' però utile anche a studenti di Liceo estraendo i concetti di base che sono spesso presentati in modo anche solo descrittivo:

- **Fisica solare**

Egidio Landi Degl'Innocenti

Springer Verlag Italia 2008

Un altro ottimo testo che descrive a fondo il Sole, lo Space Weather, l'influenza del Sole sul clima terrestre e le altre stelle simili al Sole è il seguente:

- **The Sun, Solar Analogs and the Climate**

J.D. Haigh, M.Lockwood. M.S.Giampapa

Saas-Fee Advanced Course 34, 2004

Swiss Society for Astrophysics and Astronomy

Springer 2005

Un trattato completo ed esaustivo di tutto ciò che si deve sapere sul Sole si trova invece nei seguenti tre volumi:

- **Heliophysics Vol. I**

Plasma Physics of the Local Cosmos

Edito da Carolus J.Schrijver e George L. Siscoe

Cambridge University Press 2009

- **Heliophysics Vol. II**

Space Storms and Radiation: Causes and Effects

Edito da Carolus J.Schrijver e George L. Siscoe

Cambridge University Press 2009

- **Heliophysics Vol. III**

Evolving Solar Activity and the Climates of Space and Earth

Edito da Carolus J.Schrijver e George L. Siscoe

Cambridge University Press 2009

Sono inoltre consigliate le due seguenti reviews:

- **Space Weather: The Solar Perspective**

Rainer Schwenn

Living Rev. in Solar Physics, 3 (2006), 2

- **Space Weather: Terrestrial Perspective**

Tuija Pulkinnen

Living Rev. in Solar Physics, 4 (2007), 1

Tutti i testi e gli articoli indicati sono disponibili presso la biblioteca del nostro Osservatorio per consultazione e prestito.

Sitografia

In rete sono reperibili centinaia di siti dedicati al Sole. Un elenco di quelli più importanti e consultati, anche per la ricchezza di immagini che offrono, spesso in tempo reale, è disponibile sul sito www.solarspots.net, al quale si rimanda specificatamente alla pagina:

<http://www.solarspots.net/links.htm>

Origini dei dati relativi al monitoraggio dello Space Weather utilizzati nella compilazione del Sun Daily Book:

Tutti i bollettini emessi dal NOAA/SPWC, il cui elenco completo si trova alla pagina:

<http://www.swpc.noaa.gov/alerts/AlertsTable.html>

Il sito dei bollettini e dei report NOAA dedicati allo Space Weather:

<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html#reports>

I dati relativi agli eventi energetici (flares):

<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/events.html>

Le pagine del SWPC:

http://www.swpc.noaa.gov/alerts/solar_indices.html

Il sito del SIDC, presso il quale sono stati sottoscritti diversi bollettini e reports:

<http://sidc.be/index.php>

Due siti di carattere generale, che offrono molti dati in tempo reale sul sole ed anche sullo Space Weather sono:

<http://www.solarcycle24.com/>

<http://www.spaceweather.com/>

Dati in tempo reale sono disponibili anche su:

<http://www.solarspots.net>

Glossario di alcuni termini relativi al sistema Sole-Terra

La maggior parte dei termini di questo glossario sono contenuti nel testo. Alcuni, fuori testo, sono stati aggiunti quando ritenuti importanti e significativi. In alcuni casi è stato mantenuto il termine o l'acronimo originale in lingua inglese, in quanto entrato ormai nell'uso comune (come CME ad esempio) o di difficile traduzione, che spesso ne stravolge il vero significato. Il termine "vedi" tra parentesi rimanda ad altre voci presenti nel glossario e spiegate più dettagliatamente.

Attività geomagnetica. Variazioni naturali nell'intensità del campo magnetico terrestre classificate quantitativamente in *quiet*, *unsettled* e *storm* a seconda dei valori assunti dagli indici geomagnetici planetari A_p e K_p (vedi).

Attività solare. Perturbazioni temporanee nell'atmosfera solare legate prevalentemente all'aumento dell'emissione di radiazione X tipicamente associata ai flare. Spesso però con questo termine ci si riferisce in generale allo scostamento da una situazione di Sole quieto, anche per quanto riguarda le macchie solari.

Aurora. Un debole fenomeno visuale associato all'attività geomagnetica visibile principalmente ad alte latitudini, risultante dalle collisioni tra gli atomi e le molecole dei gas atmosferici e le particelle cariche (principalmente elettroni) trasportati dal campo geomagnetico attraverso la magnetotail (vedi). Il tipico colore giallo-verde delle aurore è dovuto a specifiche transizioni di livello degli atomi di Ossigeno. Le aurore che si manifestano nei livelli più bassi dell'atmosfera presentano colori variabili, dal rosso al blu, dovuti all'emissione da parte di molecole contenenti Azoto e Ossigeno.

Ballerina Skirt. Modello tridimensionale delle traiettorie seguite dalle particelle del vento solare trascinate nel flusso del campo magnetico interplanetario IMF (vedi) oltre la corona, che richiama le pieghe della gonna di una ballerina. Spesso chiamato anche *bashful-ballerina* (ballerina timida). In realtà quest'ultimo termine indica più propriamente alcune anomalie magnetiche emisferiche del campo magnetico totale del Sole, che sembrano possedere periodicità molto lunghe.

Bow Shock. Onda d'urto stazionaria prodotta da una perturbazione in un plasma che avanza con velocità superiore a quella propria del mezzo, come nel caso del vento solare accelerato in una ICME (vedi). Traducibile con onda di prora o di prua.

Bremsstrahlung. Letteralmente: radiazione di frenamento. Raggi X o ultravioletti estremi emessi da una particella di alta energia che decelera in seguito all'urto con altre particelle cariche.

Buco coronale. Zona scura della corona, dovuta ad una diminuzione di densità di un fattore 10 rispetto al mezzo circostante che comporta un calo di emissione di un fattore 100, osservata principalmente nei Raggi X (vedi). Ai buchi coronali sono associati il vento solare veloce (vedi) e le regioni a flusso aperto. Presenti principalmente nelle zone polari durante i minimi di attività (buchi polari), possono invece estendersi molto in latitudine, attraversando quasi l'intera corona nei periodi di massimo (buchi transequatoriali).

Burst radio. Aumento improvviso nell'emissione radio dal Sole e classificati in tipi, da I a V. I più significativi per lo Space Weather sono il II ed il IV, in quanto si accompagnano spesso a flare (vedi) o CMEs (vedi).

B_z . Componente del campo IMF (vedi) diretta perpendicolarmente al piano dell'eclittica. Quando è antiparallela rispetto alle linee del campo geomagnetico (*orientazione southward*) le tempeste geomagnetiche possono essere molto più intense rispetto alla sua orientazione opposta (*northward*).

Campo geomagnetico. Il campo magnetico che circonda la Terra. Alla superficie del pianeta la sua intensità è approssimativamente di 32.000 nT (vedi) all'equatore e di 62.000 nT al polo nord.

CIR (Corotating Interaction Region). Zona della corona dove il flusso del vento solare veloce emesso da un buco coronale si interseca con quello lento prodotto da una regione attiva bipolare o da uno *streamer* coronale. Sono riconducibili alle tempeste magnetiche ricorrenti, visto che ruotano con una periodicità pari ad una rotazione di Carrington (vedi). Traducibile con Regione Interattiva Corotante.

CME. Coronal Mass Ejection o Emissione Massiva Coronale. Fuoriuscita violenta di plasma solare dalla corona spesso, ma non sempre, associata a protuberanze eruttive in cromosfera, *disruption brusque* (vedi) di filamenti cromosferici, o flare di classi energetiche elevate. Possono raggiungere velocità anche di 2000 Km/sec e sono le principali responsabili

delle tempeste geomagnetiche (vedi). Al plurale sono indicate come CMEs. Quando sono emesse in direzione geoeffettiva, cioè in rotta di collisione con la Terra, assumono un aspetto ad alone e pertanto sono dette *Full Halo CMEs* (vedi). Se la loro simmetria non è perfettamente sferica (entro un opportuno parametro angolare) sono dette *Partial Halo CMEs*.

Componente S. Fluttuazione variabile molto lentamente (periodo di settimane o mesi) osservata nell'emissione radio del Sole nel dominio delle microonde (3-100 cm.)

Corona. La parte più esterna dell'atmosfera solare, caratterizzata da basse densità ed alte temperature del plasma.

Costante solare. L'energia radiante ricevuta dal Sole in direzione perpendicolare, per unità di area e tempo, all'esterno dell'atmosfera terrestre quando la Terra si trova ad una distanza media dal Sole. Il suo valore medio è di 1.37 KW /m^2 e può variare dello 0.1% circa anche da un giorno all'altro, in corrispondenza della possibile presenza di grossi gruppi di macchie solari in fotosfera (vedi).

Cromosfera. Sottile strato dell'atmosfera solare compresa tra la fotosfera (vedi) e la regione di transizione (vedi). Ha uno spessore di circa 2000 Km ed è sede della maggior emissione da parte del Sole nella riga H α (vedi) dell'Idrogeno e delle righe H e K del Calcio. Dalla cromosfera hanno origine la maggior parte delle protuberanze solari.

CTM (continuum storm). Termine generico per indicare un rumore di fondo radio perdurante per ore e talvolta per giorni, durante il quale l'intensità dell'emissione varia in maniera regolare rispetto alla frequenza, in un intervallo di lunghezze d'onda che va dalle onde radio metriche a quelle decimetriche.

DB (disparition brusque). Filamento cromosferico che scompare improvvisamente su una scala temporale da qualche minuto a poche ore. Si tratta di protuberanze eruttive emesse lontano dal bordo del Sole e spesso lungo la linea di vista dell'osservatore terrestre. Detti a volte DSF (*disappearing solar filaments*), sono probabili indicatori del rilascio successivo di una CME, pertanto assumono un'importanza notevole nello *Space Weather*.

Diminuzioni di Forbush. Bruschi decrementi, anche del 10%, del background dei raggi cosmici galattici (vedi), associati con forti aumenti della densità del plasma del vento solare e dell'intensità del campo geomagnetico nelle vicinanze della Terra. Sono l'indizio sperimentale dell'ipotesi che un incremento dell'attività solare e geomagnetica comporti un minor flusso di raggi cosmici attraverso l'atmosfera terrestre, che qualche modello climatico sfrutta per spiegare il riscaldamento planetario ipotetico dovuto ad un massimo dell'attività solare.

Drift frequency. Deriva di frequenza. Fenomeno presentato da alcuni tipi di burst radio (vedi), che durante la loro vita "si spostano" in frequenza con diverse "velocità". Termine conosciuto anche come *radio sweep*.

DSF (disappearing solar filament). Vedi DB (disparition brusque).

Eclittica. Linea ideale ottenuta dall'intersezione del piano dell'orbita terrestre con la sfera celeste (meno propriamente, la traiettoria apparente del Sole in cielo vista dalla Terra in un anno, o viceversa).

EHF (extremely high frequency). Porzione dello spettro delle onde radio compreso tra i 30 ed i 300 GHz.

EIT. Extreme Ultraviolet Imager Telescope. Strumento a bordo della sonda SOHO (vedi), che invia immagini della bassa, media ed alta corona a diverse lunghezze d'onda nel dominio dell'ultravioletto estremo (vedi). Sta lentamente ed inesorabilmente venendo sostituito dal telescopio AIA a bordo di SDO (vedi).

Elementi geomagnetici. Insieme dei vettori e degli angoli che descrivono il campo magnetico terrestre.

ELF (extremely low frequency). Porzione dello spettro delle onde radio compreso tra i 30 ed i 3000 Hz.

Eliografico. Parametro relativo al Sole. Ad esempio la latitudine e la longitudine eliografica sono le coordinate di un gruppo di macchie solari misurate rispetto all'equatore ed al meridiano centrale, assunto come immobile, da un osservatore terrestre.

Eliopausa. Il limite ideale dell'Eliosfera (vedi), al di là del quale il vento solare non riesce a vincere la spinta contraria del vento interstellare.

Eliosfera. Regione dello spazio dove il vento solare è in grado di vincere la pressione di quello interstellare e quindi può manifestare i suoi effetti.

ENA. Electric Neutral Atoms o atomi elettricamente neutri. Ioni della plasmasfera (vedi) ricondotti ad atomi neutri grazie all'interazione con le particelle cariche del vento solare.

Esosfera. La porzione di atmosfera terrestre superiore ai 500-600 Km

EUV. Extreme Ultra Violet, Porzione dello spettro elettromagnetico compresa approssimativamente tra 100 e 1000 Å

Fasce di Van Allen. Regione della magnetosfera compresa grosso modo tra 1.2 e 6 raggi terrestri nel piano equatoriale dove particelle cariche sono stabilmente "intrappolate" dal campo geomagnetico.

Flare. Emissione improvvisa di radiazione elettromagnetica, in tutto lo spettro di frequenze e di particelle relativistiche. Si tratta di fenomeni coronali che però possono avere la loro controparte (più difficilmente) osservabile anche in cromosfera ($H\alpha$) o addirittura in fotosfera (*white-light flare*, vedi). L'emissione principale è nei Raggi X (vedi). Sono divisi in classi a seconda della potenza emessa. Quelli che hanno reale interesse per lo *Space Weather* sono di classe M e X oppure quelli di classe C, o anche B, ma di durata eccezionalmente lunga (*long-duration flares*).

Fotosfera. La "superficie visibile" del Sole. Pura illusione dovuta ad una variazione brusca della densità del plasma in corrispondenza del "raggio del Sole" (dovuta all'incremento di ioni H⁺ che hanno un forte potere di catturare i fotoni), al di sotto della quale il plasma risulta opaco alla vista umana e sopra la quale è perfettamente trasparente.

Frequenza critica f_c . Nella propagazione delle onde radio nella ionosfera terrestre, indica la frequenza al di sotto della quale si ha una incondizionata riflessione totale per qualunque angolo di incidenza dell'onda radio.

Geocorona. La regione più esterna dell'atmosfera terrestre, al di sopra della termosfera, e composta principalmente da idrogeno.

GIC (geomagnetic induced current). Una corrente elettrica quasi continua indotta in lunghi cavi conduttori o nelle condotte elettriche. Si manifesta durante forti tempeste geomagnetiche (vedi)

GPS. Global Positioning System. Una rete di satelliti orbitanti attorno alla Terra ed impiegati per la navigazione ed il posizionamento.

Halo CME. Una CME (vedi) diretta in modo geoeffettivo, cioè in direzione della Terra, che appare come un alone diffuso con simmetria quasi sferica attorno alla zona di emissione. Sono dette *Full Halo* quando la simmetria è quasi sferica, *Partial Halo* quando si discosta anche di diversi gradi da una sfera ideale.

$H\alpha$ o H-Alpha. Riga di emissione dell'idrogeno a 6563 Å in cromosfera nella quale sono più facilmente visibili le protuberanze solari al bordo ed i filamenti cromosferici.

HCS (Eliospheric Current Sheet). Superficie ideale di separazione tra le due polarità del campo magnetico interplanetario IMF (vedi), sede di una debole corrente indotta. La sua forma nello spazio in 3D è descritta allo stesso modo della spirale di Parker con un modello tipo *ballerina-skirt* (vedi)

HF (High Frequency). Porzione dello spettro di frequenze radio compresa tra 3 e 30 MHz.

HSS (High speed stream). Emissioni di vento solare (vedi) con velocità che superano i 600 Km/sec originate da buchi coronali (vedi).

Hyder flare. Flare che viene emesso lontano da regioni attive (vedi). Di bassa potenza e lenta evoluzione (la fase di crescita può durare anche un'ora), sono spesso associati alla precedente presenza di filamenti quiescenti in cromosfera. Prendono il nome da C. Hyder che studiò questi fenomeni intorno al 1967.

ICME. Interplanetary Coronal Mass Ejection. Controparte interplanetario di una CME. CME (vedi) che si estende nello spazio interplanetario. Sono le responsabili principali delle tempeste geomagnetiche (vedi). Al plurale sono indicate con ICMEs.

IMF (Interplanetary magnetic field). Campo magnetico interplanetario. Il campo coronale che, trasportato dal vento solare, si estende nello spazio intorno al Sole, all'interno dell'eliosfera. A volte indicato con *HMF (Heliospheric Magnetic Field)* o campo magnetico eliosferico)

Indice A_p . La media planetaria giornaliera dei 24 valori di altri indici, detti a_k , associati agli indici planetari K_p (vedi)

Indici K_p . Serie di 8 valori, ciascuno relativo ad ogni 3 ore nell'arco giornaliero, media planetaria dei valori ricavati da un network di 13 osservatori che misurano lo scostamento (in nT, vedi) della componente **H** del campo geomagnetico da una situazione di quiete.

Ionosfera. Regione estrema dell'atmosfera terrestre popolata da un plasma di ioni ed elettroni prodotto per effetto della radiazione elettromagnetica solare e per urto con particelle energetiche sempre provenienti dal Sole. Viene disturbata fortemente dalle tempeste geomagnetiche (vedi) e dai blackout radio (vedi).

L1. Primo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole. Posto a 1.500.00 Km dalla Terra verso il Sole, è uno dei punti dove il campo gravitazionale totale permette un equilibrio sufficiente per potervi immettere degli oggetti in orbita stabile (come SOHO, vedi).

LASCO (Large Angle Spectrometric Coronagraph). Coronografo posto a bordo della sonda SOHO (vedi). Si tratta in realtà di due strumenti (LASCO C2 e LASCO C6), che occultano la fotosfera in corrispondenza di diversi raggi solari, permettendo l'osservazione diretta della corona nell'ultravioletto.

LF (Low frequency). Porzione dello spettro di frequenze radio compresa tra 30 e 300 KHz.

Magnetoidrodinamica (MHD). Branca della fisica che si occupa dello studio di fluidi elettricamente non neutri in presenza di campi magnetici.

Magnetopausa. Il confine della Magnetosfera (vedi)

Magnetosfera. Zona dello spazio attorno alla Terra dove è presente il campo geomagnetico (vedi). E' compressa dalla parte del Sole per effetto del vento Solare ed estesa dalla parte opposta nella magnetotail (vedi).

Magnetotail. La zona della magnetosfera opposta al Sole. Traducibile con "coda magnetica".

Mesosfera. Regione dell'atmosfera terrestre posta sopra il limite superiore della stratosfera (approssimativamente a 30 Km dal suolo) e vista come limite inferiore della termosfera (80 Km dal suolo circa)

MUF (Maximum Usable Frequency). Frequenza usabile massima. La frequenza massima trasmissibile per riflessione totale in date condizioni di ionizzazione della ionosfera. Dipende dalla frequenza critica (vedi) e soprattutto da eventuali disturbi prodotti in ionosfera dalle tempeste radio o dai radio blackout.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. Ente statunitense che, in cooperazione con la US Air Force, produce svariate serie di dati planetari (tra i quali i bollettini relativi allo *Space Weather*) e solari, come la numerazione ufficiale delle regioni attive bipolari.

NOAA Space Weather Scales. Scala di livelli per classificare l'intensità di tempeste geomagnetiche, di radiazione e blackout radio.

Numero di Wolf. Parametro indice dell'attività solare in fotosfera, proposto da Rudolph Wolf nella metà dell'800 ed ancora oggi utilizzato dalla quasi totalità degli osservatori del Sole

nT. Nanotesla. Unità di misura usata per l'IMF (vedi), pari ad un miliardesimo di Tesla (T).

Onde di Alfvén. Onde d'urto prodotte in un plasma, dette magnetosoniche quando la loro velocità supera quella del suono relativa al mezzo in cui si propagano. A volte la loro velocità si approssima a quella della luce nel vuoto.

Onde di Moreton. Controparte cromosferica prodotta da perturbazioni ondose nel plasma coronale emesse verso l'interno dell'atmosfera solare (*downstream waves*) in seguito ad uno shock coronale in corrispondenza di un flare.

Ovale aurorale. Banda ellittica posta attorno ai poli magnetici terrestri che delimita il limite di visibilità in latitudine delle aurore polari.

PCA (Polar Cap Absorption). Assorbimento della calotta polare. Condizione anomala della ionosfera attorno ai poli terrestri dove le onde radio HF (vedi) e VHF (Very High Frequency) sono totalmente assorbite, mentre le LF (vedi) e VLF (Very Low Frequency) sono riflesse ad altezze minori del normale. Avviene in seguito a flare energetici, iniziando alcune ore dopo l'evento solare e può mantenersi anche per due o più giorni.

Plage. Emissione estesa nella riga H α (vedi) che spesso si presenta come tale senza che in fotosfera esistano le macchie solari come controparte (*Ha Plage o HaP*)

Plasma. Stato della materia formato da fluidi gassosi a diversi gradi di ionizzazione, al limite anche totale.

Plasmasfera. Regione dell'atmosfera terrestre, strato limite della ionosfera, formato esclusivamente da plasma (vedi)

Radiazione giromagnetica. Radiazione X o UV emessa da particelle cariche (principalmente elettroni) involtate dalla Forza di Lorentz su traiettorie spiraleggianti in un campo magnetico.

Radio blackout. Impossibilità di effettuare trasmissioni radio a diversi livelli di frequenza, in seguito ad un disturbo della ionosfera conseguente ad un forte flare solare. Il termine indica, *tout court*, la natura stessa del disturbo, infatti è associato alla potenza di un flare.

Radio emissione. Emissione da parte del Sole di onde radio di diverse lunghezze d'onda, dalle centimetriche alle decametriche, sia in condizione di Sole quieto che in seguito ad eventi energetici.

Radioflusso a 10.7 cm. Particolare emissione radio da parte del Sole alla frequenza di 2.8 GHz, modulata dall'andamento di un ciclo solare in modo praticamente parallelo alla variazione dei numeri di Wolf ridotti o sunspot numbers (vedi). Per questo motivo viene spesso usata come indice diretto dell'attività solare.

Raggi cosmici. Particelle cariche relativistiche estremamente energetiche. Esistono i raggi cosmici galattici, provenienti dall'esterno del sistema solare e fasci di particelle, dalle caratteristiche del tutto simili, emessi dal Sole durante eventi energetici intensi come le tempeste di radiazione di grado elevato.

Raggi gamma. Radiazione elettromagnetica di alta energia (superiore ai 100 KeV), misurabile durante flare solari estremamente energetici e di lunga durata.

Raggi X. Radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda molto piccola (da 1 a 10 \AA per i raggi X detti "duri", fino a 100 \AA per quelli "moll").

Regioni attive. Una zona localizzata e di breve durata (di solito alcuni giorni, anche se alcune, specialmente in prossimità dei massimi solari, si ripresentano dopo il transito sulla parte posteriore del Sole e sono dette per questo regioni di ritorno), dove si rendono visibili macchie solari, facole, plages, flares e quanto di solito connesso con l'attività solare a vari livelli di energia e dell'atmosfera della stella. Appaiono estremamente brillanti nelle immagini riprese dalle sonde spaziali nell'ultravioletto estremo. Sono dovute a forti variazioni locali nel campo magnetico del Sole, presentano sempre una bipolarità magnetica e spesso possono contenere anche più gruppi di macchie solari.

Regione di transizione. Regione dell'atmosfera solare tra la cromosfera e la bassa corona dove la temperatura del plasma cresce bruscamente di un fattore 10². Ha uno spessore stimato in poche migliaia di Km.

Region Number. Numero ufficialmente attribuito dal NOAA ad una regione attiva.

Riconnessione magnetica. Interazione tra flussi di plasma in regioni di polarità opposta di un campo magnetico. E' un fenomeno spesso invocato per spiegare l'esistenza di alcuni eventi come i flares (vedi) e le SEP (vedi)

Rotazione di Carrington. Il tempo impiegato dal centro del Sole a compiere una rotazione. Equivale a circa 27.5 giorni. Il conteggio delle rotazioni di Carrington è iniziato il 9 Novembre del 1853. Al momento della stesura di questo lavoro (Marzo 2011) è in corso la rotazione 2107.

Rotazione differenziale. Diversi periodi di rotazione presentati dal Sole in fotosfera ed anche al di sotto, ma fino alla tacochline. Variano da circa 27.5 giorni all'equatore fino ai circa 34 giorni ai poli. Le parti superiori dell'atmosfera ruotano rigidamente con un periodo pari a quello equatoriale della fotosfera, come dimostrato dai buchi coronali (vedi) e dalle CIRs (vedi) ricorrenti.

SDO. Solar Dynamic Observatory. Stazione orbitante lanciata dalla NASA nel Febbraio del 2010 che invia a Terra una mole impressionante di dati, pari a circa 1.5 Tbyte al giorno. Ospita a bordo tre strumenti principali: AIA, HMI e EVE.

SEP. Solar Energetic Particles. Flussi di particelle di altissima energia provenienti dal Sole. Quando i valori di questi flussi superano delle soglie prefissate si è in presenza di una tempesta di radiazione (vedi), che alcuni autori preferiscono indicare con lo stesso nome della causa che la produce.

SFU (Solar Flux Units). Unità di misura per il radio flusso a 10.7 cm (vedi).

Shock. Termine generico per indicare una discontinuità nella pressione, nella velocità o nella densità delle componenti cariche di un plasma o di un fluido compressibile. Queste discontinuità spesso generano un trasporto di energia nel mezzo che si propaga come un'onda, detta onda d'urto, dalle caratteristiche a volte simili, a grandissimi linee, con le perturbazioni ondose dei mezzi elastici comuni ed altre volte invece completamente diverse.

SOHO. Solar and Heliospheric Observer. Sonda lanciata dal consorzio NASA-ESA nel 1996, in orbita attorno al punto L1 (vedi) del sistema Terra-Sole. Possiede una gran quantità di strumenti a bordo, tra i quali i più conosciuti sono MDI, EIT (vedi) e LASCO (vedi). La sua durata doveva essere di 5 anni, ma sta ancora funzionando egregiamente, anche se sta venendo lentamente sostituita dalla più sofisticata SDO (vedi).

Spirale di Parker. Modello tridimensionale che illustra l'andamento nello spazio interplanetario dell'IMF (vedi) o della HCS (vedi). Spesso descritta anche con il modello *ballerina-skirt* (vedi)

Stratosfera. Porzione dell'atmosfera terrestre tra la troposfera e la mesosfera.

Strato D. Lo strato più vicino al suolo della ionosfera. Si forma solo durante il giorno, cioè sull'emisfero terrestre rivolto verso il Sole.

Strato E. Porzione intermedia della ionosfera.

Strato F. La parte più esterna della ionosfera, più lontana dalla superficie terrestre. E' separato in due sottostrati, F1 e F2. Può essere quasi completamente neutralizzato in seguito a forti disturbi radio o energetici provenienti dal Sole.

Substorm. Tempesta geomagnetica di basso grado di intensità, ricorrente con un periodo pari a quello della rotazione del centro del Sole in fotosfera (27 giorni circa). Prodotta da CIRs (vedi) o da buchi coronali ricorrenti.

Sunspot number. Indice dell'attività fotosferica calcolato giornalmente, mensilmente e trimestralmente dal SIDC (Solar Influences Data Analysis Center) di Bruxelles, ottenuto elaborando i numeri di Wolf inviati da circa 80 Osservatori sparsi in tutto il mondo. Ad ogni Osservatorio è assegnato un coefficiente di riduzione, per correlare i dati tra loro e rapportarli alle osservazioni originali di R.Wolf e dei suoi assistenti. Indicato con il simbolo Ri, spesso è chiamato anche ISN (*International Sunspot Number*).

SWPC. Solar Weather Prediction Center. Ente preposto dal NOAA all'analisi ed alle previsioni dello *Space Weather*.

Tempesta di radiazione. Flusso di particelle cariche di alta energia che investe la Terra proveniente dal Sole ed emesso durante un flare di classe elevata o in seguito all'onda d'urto generata da una ICME (vedi) ad alta velocità.

Tempesta geomagnetica. Serie di disturbi nel campo geomagnetico prodotti dall'arrivo di vento solare ad alta velocità in seguito ad una Halo-CME (vedi)

Tempesta ionosferica. Disturbi nello strato F (vedi) della ionosfera, in concomitanza di attività geomagnetica o black-out radio. In generale, ci sono due fasi di una tempesta ionosferica: un incremento iniziale nella densità degli elettroni del plasma ionosferico (fase positiva), della durata di alcune ore, seguita da un suo lento decremento nell'arco di alcuni giorni (fase negativa).

Tenflare. Un flare accompagnato da un burst radio (vedi) alla lunghezza d'onda di 10.7 cm tipica del radioflusso a 2.8 GHz (vedi) che supera di oltre il 100% il normale valore di fondo.

Teorema di Alfvén. Detto anche *Frozen-in Flux Theorem* o teorema del flusso congelato. Di capitale importanza in molte questioni di magnetoidrodinamica (vedi) ed in fisica solare, afferma che la variazione nel tempo del flusso di un campo magnetico immerso in un plasma di elevata conducibilità non varia attraverso un volume arbitrario.

Termination Shock. Zona dell'eliosfera (vedi) dove la velocità del vento solare (vedi) scende al di sotto di quella del suono relativamente al mezzo in cui si muove.

Termosfera. Regione dell'atmosfera terrestre che ha inizio al di sopra della mesosfera e si estende per 80-85 Km verso la mesosfera.

Troposfera. La parte più interna dell'atmosfera terrestre, dal suolo fino alla stratosfera. Si estende per circa 13 Km.

Unsettled. Condizione di disturbo del campo geomagnetico conseguente ad un indice K_p (vedi) pari a 4.

Vento solare. Flusso di particelle connesse al campo magnetico IMF (vedi) per il teorema di Alfvén (vedi), emesse dal Sole. Si divide convenzionalmente in lento (emesso in corrispondenza delle regioni attive) e veloce (emesso dai buchi coronali e dalle zone polari del Sole). Alla distanza di un'unità astronomica la velocità media del vento solare in condizioni di Sole quieto è di 375 Km/sec e la densità di particelle (protoni ed elettroni) di 5 particelle per centimetro cubo. L'intensità totale del campo IMF (vedi) è normalmente di 5 nT (vedi), nelle stesse condizioni ed alla stessa distanza dal Sole.

White-Light Flare. Flare in luce bianca. Controparte fotosferica di un flare coronale di classe energetica molto elevata che si rende visibile anche in fotosfera nel continuo, in seguito ad una ricaduta verso gli strati più interni del Sole di particelle cariche energetiche. Piuttosto rari, lo sono meno se osservati in luce monocromatica nella riga $H\alpha$ (vedi).

NOAA Space Weather Scales



The NOAA Space Weather Scales were introduced as a way to communicate to the general public the current and future space weather conditions and their possible effects on people and systems. Many of the SWPC products describe the space environment, but few have described the effects that can be experienced as the result of environmental disturbances. These scales will be useful to users of our products and those who are interested in space weather effects. The scales describe the environmental disturbances for three event types: geomagnetic storms, solar radiation storms, and radio blackouts. The scales have numbered levels, analogous to hurricanes, tornadoes, and earthquakes that convey severity. They list possible effects at each level. They also show how often such events happen, and give a measure of the intensity of the physical causes. See [New Scales Help Public, Technicians Understand Space Weather](#)

The NOAA Space Weather Scales are used on these SWPC web pages and products:

- [Space Weather Alerts](#)
- [Space Weather Now](#)
- [Space Weather Advisories](#)
- [WWV Geophysical Alert Message](#)

The NOAA Space Weather Scales tables are shown below.

Geomagnetic Storms: disturbances in the geomagnetic field caused by gusts in the solar wind that blows by Earth.	G1	G2	G3	G4	G5
Solar Radiation Storms: elevated levels of radiation that occur when the numbers of energetic particles increase.	S1	S2	S3	S4	S5
Radio Blackouts: disturbances of the ionosphere caused by X-ray emissions from the Sun.	R1	R2	R3	R4	R5

[NOAA Scales table in Adobe .pdf format](#)

[NOAA Scales table in Spanish](#)

NOTE: The Boulder K-index is the real-time proxy for the Planetary K (Kp) values that define the Geomagnetic Storm (G-scale) on the NOAA Space Weather Scales. Kp is not available in real time and is usually delayed by approximately 30 minutes. To enable the fastest possible alerts of Geomagnetic Storm activity, the Boulder K-index is used as a substitute, 1 minute behind real time. Kp and the Boulder K-index will generally show the same overall trend of activity. However, differences in the absolute magnitude of these indices can result in differences in the G-level (or K-index) reached. These differences are generally restricted to plus or minus one G or K-level, although larger deviations are infrequently observed. Through partnership with the US Geological Survey, SWPC is working to eliminate the need for a Planetary K proxy by deriving an estimated Planetary K in real time. Real-time derivation of the Planetary K is anticipated by October 1, 2011. Products that currently use the Boulder K as a proxy will be transitioned to Planetary K at that time.

NOAA Space Weather Scale for Geomagnetic Storms

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Geomagnetic Storms			Kp values* determined every 3 hours	Number of storm events when Kp level was met; (number of storm days)
G 5	Extreme	<p>Power systems: : widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage.</p> <p>Spacecraft operations: may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites.</p> <p>Other systems: pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	<p>Power systems: possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid.</p> <p>Spacecraft operations: may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: induced pipeline</p>	Kp = 8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)

		currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.)**.		
G 3	Strong	<p>Power systems: voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices.</p> <p>Spacecraft operations: surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems.</p> <p>Other systems: intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	<p>Power systems: high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage.</p> <p>Spacecraft operations: corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions.</p> <p>Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.)**.</p>	Kp = 6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	<p>Power systems: weak power grid fluctuations can occur.</p> <p>Spacecraft operations: minor impact on satellite operations possible.</p> <p>Other systems: migratory</p>	Kp = 5	1700 per cycle (900 days per cycle)

		animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine)**.		
--	--	---	--	--

* The K-index used to generate these messages are derived in real-time from the [Boulder NOAA Magnetometer](#). The Boulder K-index, in most cases, approximates the Planetary Kp-index referenced in the NOAA Space Weather Scales. The Planetary Kp-index is not available in real-time.

** For specific locations around the globe, use geomagnetic latitude to determine likely sightings ([Tips on Viewing the Aurora](#))

NOAA Space Weather Scale for Solar Radiation Storms

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Solar Radiation Storms			Flux level of ≥ 10 MeV particles (ions)*	Number of events when flux level was met (number of storm days**)
S 5	Extreme	<p>Biological: unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity); passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.***</p> <p>Satellite operations: satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources; permanent damage to solar panels possible.</p> <p>Other systems: complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.</p>	10^5	Fewer than 1 per cycle
S 4	Severe	<p>Biological: unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be</p>	10^4	3 per cycle

		<p>exposed to radiation risk.***</p> <p>Satellite operations: may experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded.</p> <p>Other systems: blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.</p>		
S 3	Strong	<p>Biological: radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.***</p> <p>Satellite operations: single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely.</p> <p>Other systems: degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.</p>	10^3	10 per cycle
S 2	Moderate	<p>Biological: passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk.***</p> <p>Satellite operations: infrequent single-event upsets possible.</p> <p>Other systems: small effects on HF propagation through the polar regions and navigation at polar cap locations possibly affected.</p>	10^2	25 per cycle
S 1	Minor	<p>Biological: none.</p> <p>Satellite operations: none.</p> <p>Other systems: minor impacts on HF radio in the polar regions.</p>	10	50 per cycle

* Flux levels are 5 minute averages. Flux in $\text{particles}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ster}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$. Based on this measure, but other physical measures are also considered.

** These events can last more than one day.

*** High energy particle measurements (>100 MeV) are a better indicator of radiation risk to passenger and crews. Pregnant women are particularly susceptible.

NOAA Space Weather Scale for Radio Blackouts

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle=11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Radio Blackouts			GOES X-ray peak brightness by class and by flux*	Number of events when flux level was met; (number of storm days)
R 5	Extreme	<p>HF Radio: Complete HF (high frequency**) radio blackout on the entire sunlit side of the Earth lasting for a number of hours. This results in no HF radio contact with mariners and en route aviators in this sector.</p> <p>Navigation: Low-frequency navigation signals used by maritime and general aviation systems experience outages on the sunlit side of the Earth for many hours, causing loss in positioning. Increased satellite navigation errors in positioning for several hours on the sunlit side of Earth, which may spread into the night side.</p>	X20 (2×10^{-3})	Less than 1 per cycle
R 4	Severe	<p>HF Radio: : HF radio communication blackout on most of the sunlit side of Earth for one to two hours. HF radio contact lost during this time.</p> <p>Navigation: Outages of low-frequency navigation signals cause increased error in positioning for one to two hours. Minor disruptions of satellite navigation possible on the sunlit side of Earth.</p>	X10 (10^{-3})	8 per cycle (8 days per cycle)
R 3	Strong	HF Radio: Wide area blackout of HF radio communication, loss of radio contact for about an hour on	X1 (10^{-4})	175 per cycle (140 days per cycle)

		sunlit side of Earth. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for about an hour.		
R 2	Moderate	HF Radio: Limited blackout of HF radio communication on sunlit side, loss of radio contact for tens of minutes. Navigation: Degradation of low-frequency navigation signals for tens of minutes.	M5 (5×10^{-5})	350 per cycle (300 days per cycle)
R 1	Minor	HF Radio: Weak or minor degradation of HF radio communication on sunlit side, occasional loss of radio contact. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for brief intervals.	M1 (10^{-5})	2000 per cycle (950 days per cycle)

* Flux, measured in the 0.1-0.8 nm range, in $W \cdot m^{-2}$. Based on this measure, but other physical measures are also considered.

** Other frequencies may also be affected by these conditions.

March 1, 2005

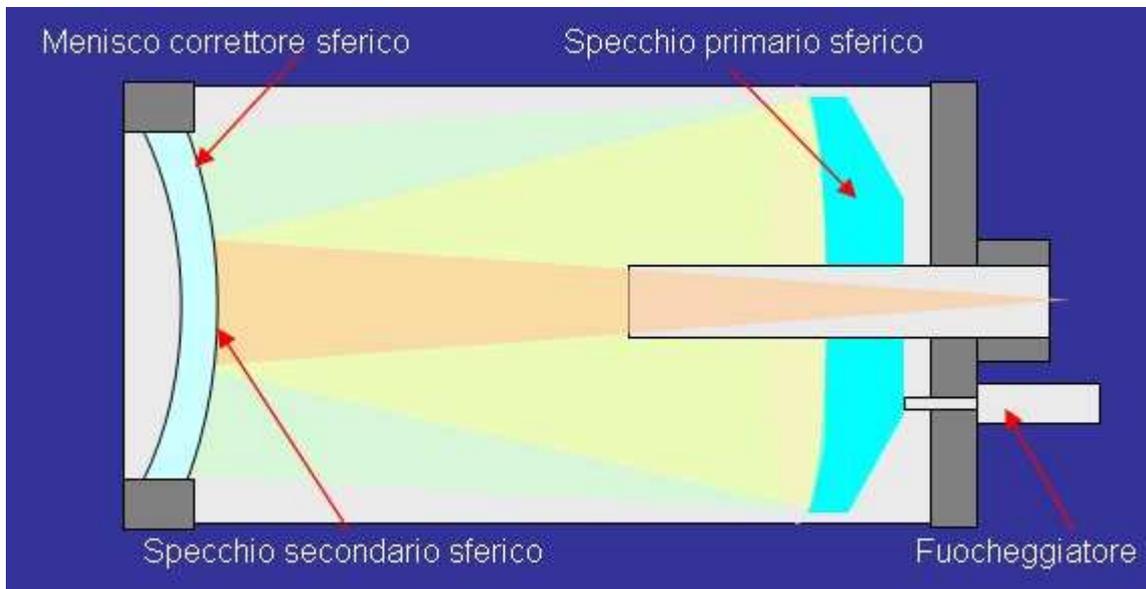
I nostri telescopi

L'attività del nostro Osservatorio Solare riguarda principalmente lo studio della fotosfera, con il conteggio dei gruppi e delle macchie, la classificazione dei gruppi in base al metodo di Zurich, il calcolo del numero di Wolf non ridotto e la stesura di un disegno del disco solare. Tutto questo per ogni giorno in cui le condizioni meteo permettono l'osservazione. Nel 2009 sono state effettuate 287 osservazioni e 279 nel 2010, con altrettanti disegni. Dal 15 Settembre del 2010 i dati relativi vengono inviati al SIDC ed il nostro Osservatorio, unica scuola superiore di secondo grado al mondo, fa parte del network di Osservatori accreditati per il calcolo degli ISN (International Sunspot Numbers).

Le osservazioni della fotosfera vengono compiute di norma in proiezione diretta, con un oculare Zeiss da 40 mm. montato su un telescopio catadiottrico con ottica Maksutov - Cassegrain di 150 mm. di apertura e 1800 mm. di focale (rapporto f/12) in modo da ottenere un disco proiettato di 25 cm. di diametro, che è lo standard impiegato nei principali Osservatori, anche quelli professionali. In casi particolari l'osservazione può venire affinata in osservazione diretta con un filtro in Mylar a tutta apertura di densità 5 e l'utilizzo di vari oculari per ottenere il grado voluto di ingrandimento. Il telescopio, su montatura equatoriale, è stazionato e motorizzato su entrambi gli assi. Visto che si opera all'esterno, l'apertura non viene diaframmata per poter avere il massimo della luminosità.

Nel seguito è descritto brevemente un tipo di telescopio come quello usato da noi:

Il catadiottrico Maksutov - Cassegrain è una variante del Cassegrain; la sezione di entrambi gli specchi è sferica mentre all'inizio del cammino ottico si trova un correttore a menisco con entrambe le superfici sferiche, la cui funzione è introdurre una quota di aberrazione sferica uguale alla stessa prodotta dall'ottica a riflessione ma di segno algebricamente opposto.



Nel Maksutov - Cassegrain classico (configurazione *Gregory*) lo specchio secondario è ottenuto alluminando la porzione centrale interna del menisco correttore; questo stratagemma riduce di molto l'ostruzione centrale e semplifica sia l'ottica che la meccanica (non è presente lo specchio secondario né tantomeno un suo supporto) a tutto vantaggio di un migliore contrasto. Il rovescio della medaglia è però l'esigenza sul piano ottico della presenza di una lunga focale ($f/13$ e oltre) poiché la curvatura del menisco impone un forte potere moltiplicatore al secondario. I punti di forza di questi strumenti sono la compattezza (a vantaggio della montatura e della trasportabilità), il tubo chiuso che riduce le turbolenze interne e l'aplanaticità che scongiura la presenza di aberrazione sferica. Un problema di queste ottiche può essere rappresentato da un lungo periodo di acclimatazione termico dovuto principalmente allo spessore del menisco; spesso i costruttori fanno uso di ventilatori per velocizzare gli scambi di temperatura. In sostanza questi strumenti sono molto validi per le osservazioni degli oggetti del Sistema Solare, la separazione di stelle doppie e anche saltuariamente oggetti del fondo cielo; per contro hanno spesso un campo corretto molto piccolo che può penalizzarne l'uso fotografico, tuttavia il Maksutov-Cassegrain nelle varianti *Sigler* e *SiMak* è ottimizzato per la fotografia al fuoco diretto.

Parallelamente alle osservazioni della fotosfera vengono compiute anche quelle della cromosfera nella riga $H\alpha$ per studiare l'attività al lembo, con il conteggio delle protuberanze al bordo e dei filamenti e delle facole cromosferiche. Il risultato dell'osservazione è il numero di Pettis (prominence number), l'analogo di quello di Wolf e ottenuto con una formula analoga, che anziché macchie e gruppi coinvolge nuclei di protuberanze e relativi elementi. La classificazione delle protuberanze al lembo è effettuata in base a due scale distinte, una morfologica (detta di Zirin) e l'altra costruita in base alle dimensioni delle protuberanze rapportate a frazioni del raggio del Sole (classificazione di Volker).

Lo strumento utilizzato per queste osservazioni (più sporadiche e meno sistematiche rispetto a quelle fotosferiche) è un Coronado PST (Personal Solar Telescope) da 40 mm. di apertura e 400 mm. di focale, utilizzato in osservazione diretta con un oculare da 10 mm. per la visione del disco

intero e uno da 6 mm. per i dettagli più fini al bordo. Lo strumento utilizza un filtro interferenziale del tipo Fabry-Perot con banda passante di 1\AA non smontabile, quindi è assolutamente sicuro anche se usato da persone poco esperte.

Oltre a questi in Osservatorio sono disponibili altri strumenti, in particolare:

- Un riflettore newtoniano da 114/900, usato raramente e solo in proiezione per scopi dimostrativi (visite guidate in Osservatorio da parte di privati o Scuole)
- Un riflettore newtoniano da 130/650 con montatura altoazimutale SkyWatcher motorizzata con ricerca automatica previo allineamento con una, due o tre stelle di riferimento a seconda del grado di precisione nell'inseguimento desiderato. Questo strumento è impiegato soprattutto per osservazioni notturne e a volte anche per il Sole in caso di osservazioni dimostrative di gruppo, vista la facilità di puntamento che non richiede la stazionatura.
- Un rifrattore galileiano da 90/1000 stazionato su montatura equatoriale con motorizzazione in AR, utilizzato saltuariamente per effettuare fotografie del Sole o della Luna e ultimamente impiegato come guida motorizzata per il Coronado PST durante le osservazioni in $H\alpha$ (altrimenti montato su un supporto fotografico altazimutale, molto maneggevole e stabile ma non motorizzabile)
- Un binocolo astronomico 20X80 su supporto stativo altazimutale, impiegato per osservazioni notturne di ampie porzioni della volta celeste, vista la sua estrema luminosità e la comodità della visione binoculare.