

Cosa sarà mai?

## Space Weather

**Mario Gatti**

**Osservatorio Solare ISIS Valceresio – Via Roma 57, 21050 Bisuschio (Varese)**

Sicuramente vi starete chiedendo come mai il titolo di questo articolo utilizzi un termine inglese. E ne troverete altri, ma non vi faranno tanta impressione, tranquilli. Se avrete la pazienza di leggerlo fino in fondo ne capirete il motivo. Molte parole o modi di dire provenienti da altre lingue sono ormai entrati a far parte a pieno diritto della lingua italiana parlata, quella di tutti i giorni: alzi la mano chi di voi, di fronte ad un pc "impallato", ha mai detto " *riavvio correttamente il sistema operativo a causa di un blocco inaspettato*". Tutti direste " *resetto il computer*" elevando addirittura a rango di verbo un termine, *reset*, che letteralmente vuol dire " *risistemazione*". Questo verbo in italiano non esiste. Così come " *Savoir Fare*" in francese ha in italiano un significato ben più profondo ed esteso di quanto non dica la sua semplice traduzione letterale.

Perché questo lungo excursus linguistico iniziale? Perché quando si parla del Sole o meglio, di certi eventi che accadono su di esso, ci si ostina ad utilizzare termini che in italiano non hanno alcun senso, invece dell'unica parola che da sola dice tutto, *Space Weather* appunto. Ecco che allora ci ritroviamo con articoli di riviste e giornali, commentatori e giornalisti televisivi e radiofonici che ci sommergono di parole terrificanti come tempesta, tsunami, tornado solari. Ci manca solo l'Apocalisse Solare e poi abbiamo fatto il pieno. Io mi occupo, un po' per passione e un po' per lavoro, di cose che riguardano il Sole: di fronte a tutto questo sproloquio credo sia doveroso fare un pochino di chiarezza e dare delle informazioni magari meno coreografiche, ma più precise e puntuali. E' quello che spero di riuscire a fare scrivendo queste righe.

Tradotto letteralmente, *Space Weather* potrebbe suonare come " *meteorologia spaziale*". Anche se, come vedremo poi, si azzarda qualche genere di previsione, il termine e' di fatto intraducibile. *Space Weather* sta a significare l'insieme di tutti i fenomeni che, avvenendo sul Sole, possono avere delle implicazioni per la Terra o gli altri corpi del Sistema Solare, di quali possano essere le cause che stanno alla base di questi fenomeni e dei loro effetti sulla nostra vita, la nostra società, la nostra economia, sul genere umano insomma. E' qualcosa di più che prevedere quanta neve cadrà domani nel Canton Ticino, non in termini di importanza, chiaro, ma per il significato intrinseco della cosa.

Ecco che allora tutti i paroloni tipo tsunami e tornado solari non servono più: e' sufficiente, per dire che sul Sole e' successo qualcosa che potrebbe magari dare qualche fastidio a noi terrestri, parlare di disturbo dello *Space Weather*, che questa volta si e' una traduzione letterale del corrispondente termine anglosassone " *Space Weather Disturbance*", ma di senso compiuto. Straordinario come io abbia dovuto scrivere quasi una pagina per rendere la stessa idea per la quale la lingua inglese impiega tre parole.

Prima di addentrarci quindi nei meandri di questo misterioso *Space Weather* (d'ora in poi lo chiameremo solo così) diamo un'occhiata alla figura 1: in questa immagine (ovviamente di fantasia) si cerca di riassumere visivamente tutti i concetti espressi fin qui: noterete che sono rappresentati sia il Sole che la Terra, i mari, i continenti, gli aerei, i satelliti per le comunicazioni e tante altre cose, visto che ci stiamo occupando delle ripercussioni di eventi solari sulla Terra o, come correttamente potremmo dire, del sistema Sole - Terra. Invece sentendo parlare di "tempeste solari" o peggio ancora

di tsunami e tornados solari viene spontaneo tirare in ballo solo la nostra stella, dimenticando che ci siamo anche noi e che le cause dello Space Weather sono sì solari, ma gli effetti sono terrestri e speriamo di non dovercene accorgere davvero, come capirete nel seguito di questo scritto.



*Figura 1: Rappresentazione immaginaria dello Space Weather (Cortesia: nswp.gov)*

## **Dalla parte del Sole**

*Corona, Vento Solare, Eliosfera, Campi magnetici*

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 più "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 zona radiativa, dove prevale il meccanismo della convezione per il trasporto dell'energia: 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 maggiore 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 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) e' ben lontano dall'essere stato pienamente risolto. Ma non è l'unico.

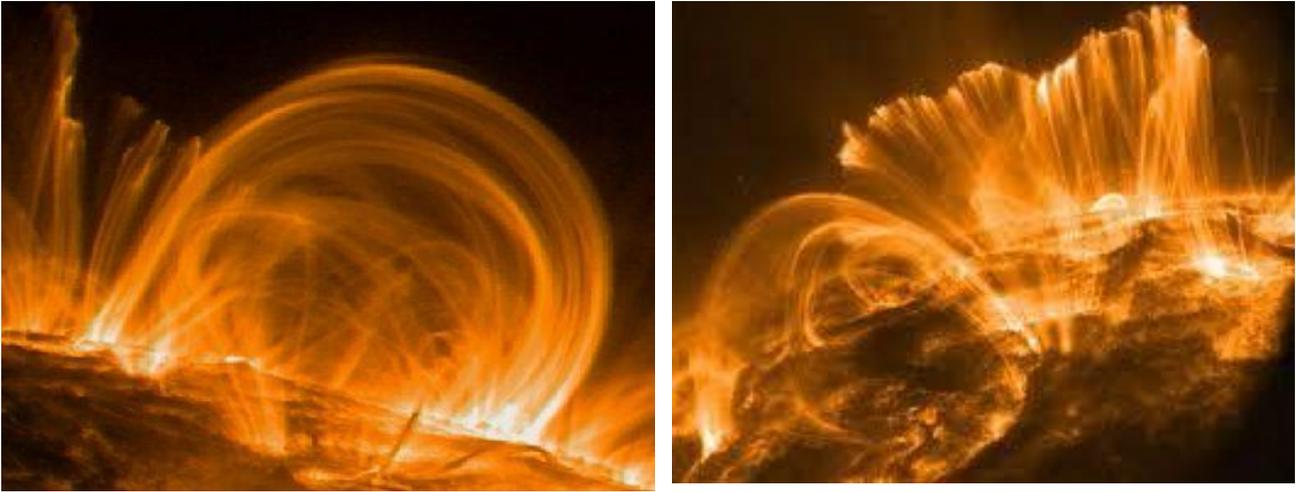
Il primo grande problema che si è presentato ai fisici solari è stato quello della natura stessa della corona. Un punto di partenza per cercare di capirci qualcosa è quello di supporre che la corona, in prima approssimazione, sia statica, a simmetria sferica e praticamente isoterma. Una sorta di palla 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 isothermicità 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. 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.

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 (zone della corona che appaiono scure, specialmente se osservate nei Raggi X, per via della loro minore densità rispetto a quella media del plasma coronale, che comporta una minore emissione di radiazione) 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. 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.

Si dimostra (grazie ad un risultato molto noto in Fisica solare, detto Teorema di Alfvén), che 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.

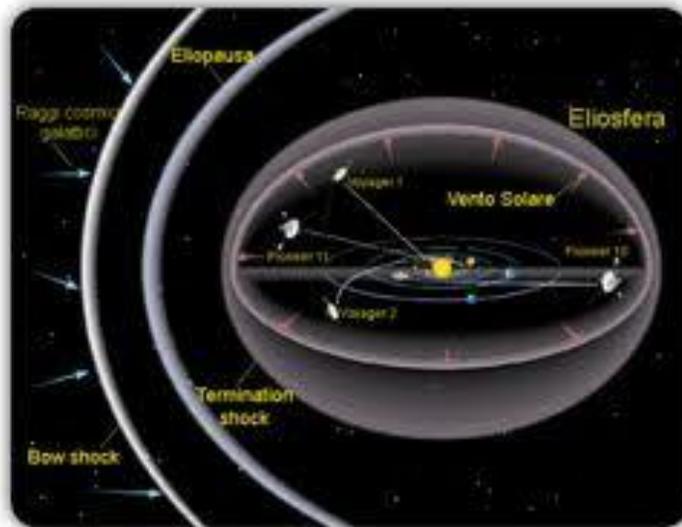


**Figura 2: Loops (archi) coronali ripresi nell’ultravioletto estremo dalla sonda TRACE. Queste strutture sono un’effettiva visualizzazione del campo magnetico coronale, che viene trascinato dal moto del plasma coronale. (Cortesia: windows2universe.com & arstecnica.com)**

Possiamo a questo punto trarre alcune importanti 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. Il vento solare, essendo formato da particelle elettricamente cariche (ioni ed elettroni) in moto in tutte le direzioni verso l’esterno della corona, è quindi sede di un debole campo magnetico, chiamato campo magnetico interplanetario (o IMF, *Interplanetary Magnetic Field*).

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) . 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 3 illustra dettagliatamente quanto esposto a proposito dell’Eliosfera:



**Figura 3: L'eliosfera e le altre zone descritte nel testo (Cortesia: nmdb.eu)**

Parliamo ora delle Emissioni di Massa Coronali o CME (che in inglese sta per *Coronal Mass Ejection*, il che vuol dire proprio la stessa cosa). Le CME sono osservabili solo attraverso i coronografi, strumenti posti a bordo di sonde spaziali (come SOHO, sul quale opera il coronografo chiamato LASCO, acronimo di 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 aloni 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 a meno che, ovviamente, non sia stata generata nella parte posteriore del disco solare, il che succede e anche spesso.

Quasi sempre una CME 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, 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 CME veloce sono le cause di origine solare che possono produrre dei disturbi sulla Terra detti tempeste geomagnetiche. Altri fenomeni che avvengono sul Sole e che hanno una capitale importanza nei disturbi dello Space Weather sono i flare: ci limiteremo a dire che si tratta di emissioni di radiazione elettromagnetica su tutto lo spettro, dai Raggi X alle onde radio e di particelle molto veloci (elettroni e protoni), a volte anch'esse quasi relativistiche. Per una trattazione più esaustiva dell'argomento (che qui porterebbe via troppo tempo e spazio) si rimanda all'articolo "Flare Solari", pubblicato sul numero 209 di Meridiana. Ma ora spostiamoci di 150 milioni di Km e torniamo con i piedi per terra o meglio con la testa nelle nuvole anzi, molto più in alto di loro.

## Dalla parte della Terra

### *Ionosfera e campo geomagnetico*

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)

Di tutta la 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 O<sub>2</sub> 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<sup>+</sup> e O<sub>2</sub><sup>+</sup>. 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<sub>s</sub>, attribuito all'arrivo di possibili sciami meteorici.
- *Lo strato F* (tra i 150 e gli 800 Km dal suolo), che possiede la maggior densità di plasma, stimata a 10<sup>6</sup> particelle per cm<sup>3</sup> durante il giorno, il quale viene suddiviso di giorno in due sottostrati: F1, con NO<sup>+</sup> come specie ionizzata dominante e F2 con dominante O<sup>+</sup>.

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

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 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 critica 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 CME 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, che chiameremo  $N$ , 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 è proporzionale a  $N$ , la stessa tende a diminuire a sua volta 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 dalle particelle energetiche provenienti dal Sole.

Per finire, occupiamoci ora dell'estensione nella spazio attorno alla Terra da parte del suo campo magnetico, detto *geomagnetico*. 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. La magnetosfera è invece fortemente influenzata dalla presenza del Sole e soprattutto dal continuo arrivo di vento solare. L'arrivo del vento solare dal Sole determina infatti 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 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 (Flare, CME ecc.) possono influenzare in modo a volte drammatico la magnetosfera.



**Figura 4: Campo Magnetico della Terra: la parte verso il Sole è fortemente deformata dall'arrivo del vento solare. Dalla parte opposta si estende la lunghissima “coda magnetica”.**  
(Cortesia: Hawaii.edu)

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.

## 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.

### 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. Il campo magnetico interplanetario IMF deve avere una particolare caratteristica di orientazione relativamente a quello della Terra. Questa situazione è chiamata in inglese “*southward*”, e sta a significare che i due campi assumono orientamenti opposti.

Una CME associata magari ad un flare di classe elevata (M o X: i flare sono suddivisi in classi secondo la potenza emessa, quelli di classe M e/o X sono i più “energetici”) 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* del campo magnetico che viaggia con lei 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, nei primi giorni di Marzo del 2012 un paio di flare di classe X e quasi una decina di classe M si sono verificati sul Sole e insieme a loro sono state emesse alcune CME in direzione geoeffettiva. La responsabile di questa attività (che ha fatto molto “rumore” nei media ed è stata ribattezzata subito la “*Women Day Storm*”, tempesta del giorno delle donne, perché i suoi effetti si sono sentiti sulla Terra attorno al 8 e al 9 Marzo), è stata una Regione Attiva, battezzata NOAA 11429 (vedremo tra poco cosa vuol dire NOAA, per ora ci basti sapere che tra le altre cose questi signori si divertono a numerare le Regioni Attive sul Sole dal 1971) che si trovava in direzione quasi geoeffettiva nell’emisfero Nord ma ancora abbastanza lontana dal meridiano centrale del Sole. Questa Regione aveva al suo interno un grosso gruppo di macchie, potenzialmente in grado di essere l’indice di possibili fenomeni fortemente energetici, ma quella che è mancata è stata proprio l’orientazione del campo associato alle CME, che non si è mai portata nel verso giusto. Ecco perché gli effetti prodotti dalla “tempesta della festa della donna” sono stati rilevanti sì, ma non certo di portata eccezionale. Invece nel 1859 Richard Carrington, un astronomo britannico, osservò casualmente un brillamento (la controparte in luce visibile 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 chiamata ITM (ionosfera, termosfera, mesosfera). 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, intrappolati dal campo magnetico terrestre su una traiettoria praticamente circolare quasi nel piano equatoriale del pianeta.

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 del campo magnetico terrestre che si trova 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 CME non sono le uniche possibili cause di tempesta geomagnetica. Anche i buchi coronali, che emettono vento solare veloce possono essere coinvolti, anche se esiste però una differenza sostanziale: essendo legati alla rotazione solare, i buchi coronali 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 reindirizzate 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 passano proprio dai poli magnetici terrestri, dove tra l'altro il campo è anche più intenso. Questi sono gli effetti decisamente più spettacolari: meglio invece non sperimentare quelli 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 verificassero, ma di questo ci occuperemo nell'ultima sezione.

Le tempeste geomagnetiche sono classificate secondo una scala prodotta dal NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) che prevede 5 livelli, in base ai valori assunti da un parametro medio calcolato a Terra da 13 Osservatori sparsi in tutto il mondo e detto Indice Geomagnetico Planetario,

indicato con il simbolo  $K_p$ . Questo viene utilizzato dal SWPC (*Space Weather Prediction Center*, centro previsionale dello Space Weather) 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 temporali detti sinottici (intesi come intervalli 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*, cioè minore, moderato, forte, severo e estremo. Tanto per intenderci, gli effetti della “*Women Day Storm*”, nonostante gli strombazzamenti dei media, hanno raggiunto ma non superato il grado G3. La Terra si è bevuta qualche bicchierino di attività solare, ma senza ubriacarsi nel modo più assoluto.

### 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 Raggi X o Ultravioletti di alta energia. 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 CME che spesso viaggiano di conserva con i primi, come gli alpinisti in cordata, con un certo ritardo. 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 CME 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 CME, 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

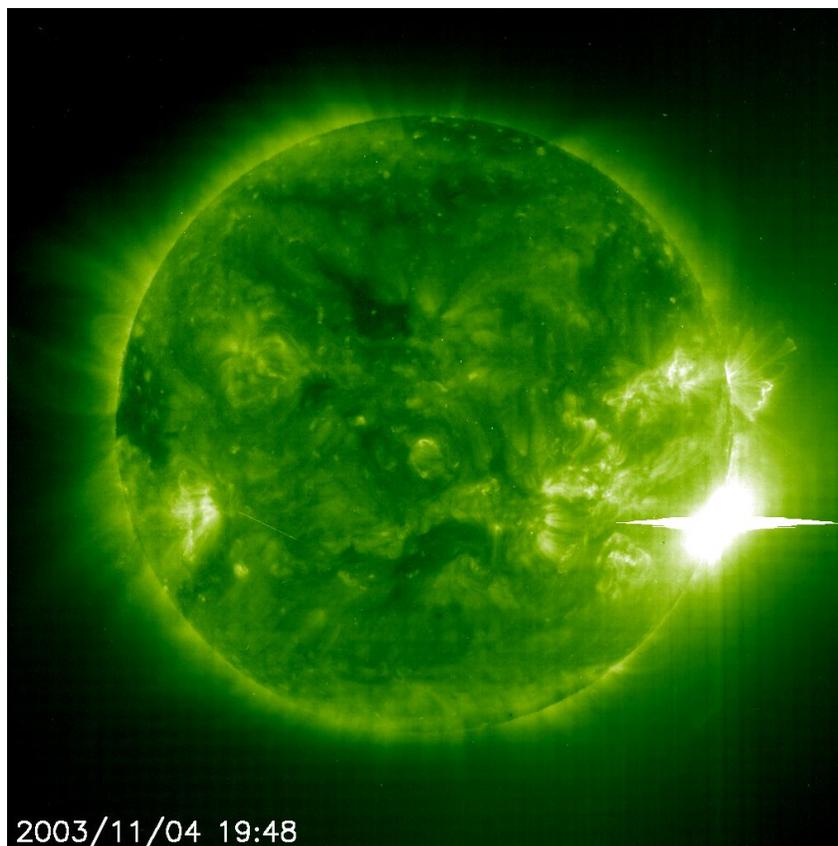
astronauti impegnati in EVA (*Extra-Vehicular Activities*), le “passeggiate spaziali”, magari necessarie per riparare un componente guasto di un modulo di una stazione orbitante o di un satellite. Poi ci sono effetti elettromagnetici: l’energia trasportata dalle SEP può danneggiare anche seriamente i 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. Quando queste energie superano delle soglie prefissate scattano i vari gradi S (che sta per Solar Particles).

## **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. I flare, come detto, 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, come abbiamo già avuto modo di dire, vengono emesse radiazione elettromagnetica 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 a volte anche solo 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 plasmasfera 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 5). 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.



*Figura 5: Impressionante flare di classe X28.2 ripreso dal telescopio EIT a bordo della sonda SOHO alla frequenza di  $195\text{\AA}$ , nell'ultravioletto estremo. Eventi come questo, con le giuste caratteristiche di direzionalità, possono provocare blackout radio ed altri effetti di portata estrema, in grado di produrre danni incalcolabili per l'attività umana. (Cortesia NASA/ESA – SOHO/EIT)*

## **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

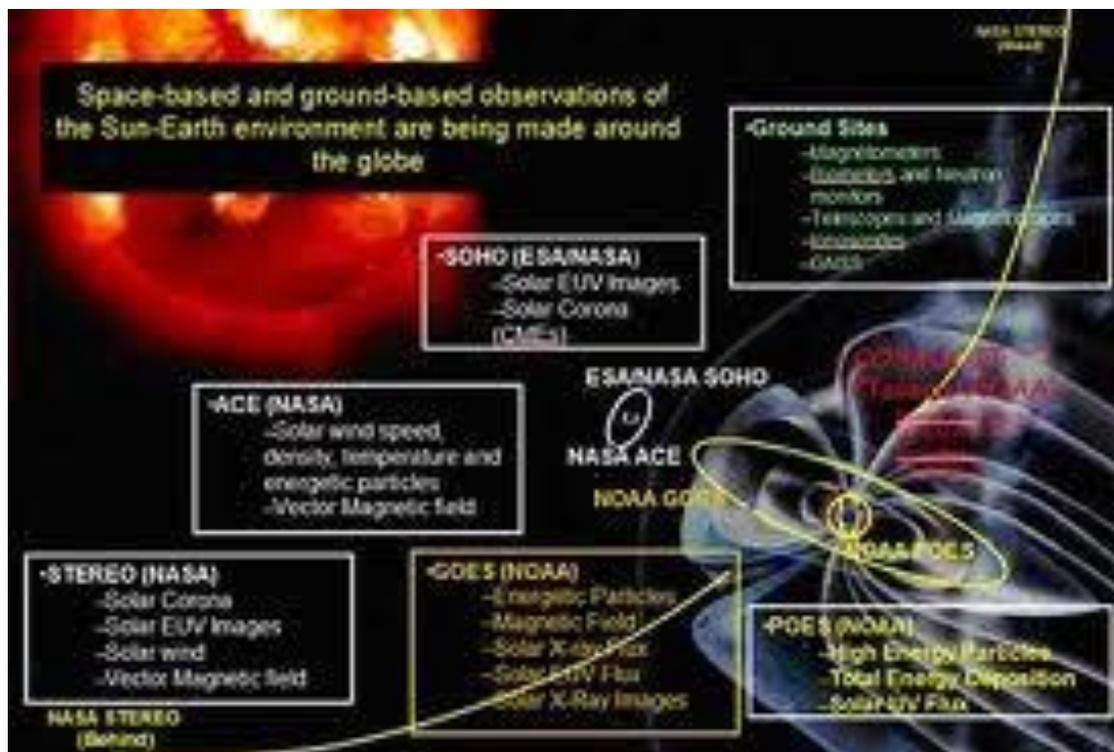
delle moderne infrastrutture in caso di severi disturbi provenienti dal Sole e la necessità di sviluppare possibili contromisure volte a ridurre i rischi connessi si basano in massima parte su due soli eventi: le tempeste geomagnetiche del Marzo 1989 e di Ottobre-Novembre 2003 (detta *Halloween Storm*, visto che si è manifestata principalmente nella notte del 30 Ottobre, i fisici solari hanno una fantasia sterminata per “battezzare” le tempeste solari), 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.

Una possibile soluzione al problema delle contromisure che potrebbero essere messe in atto in caso di “minaccia solare” 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 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 CME transita al di qua di quello che si chiama 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. Questo è un punto di equilibrio tra il campo gravitazionale della Terra e quello del Sole, che si compensano, per così dire, l’uno con l’altro. 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 poverà”.



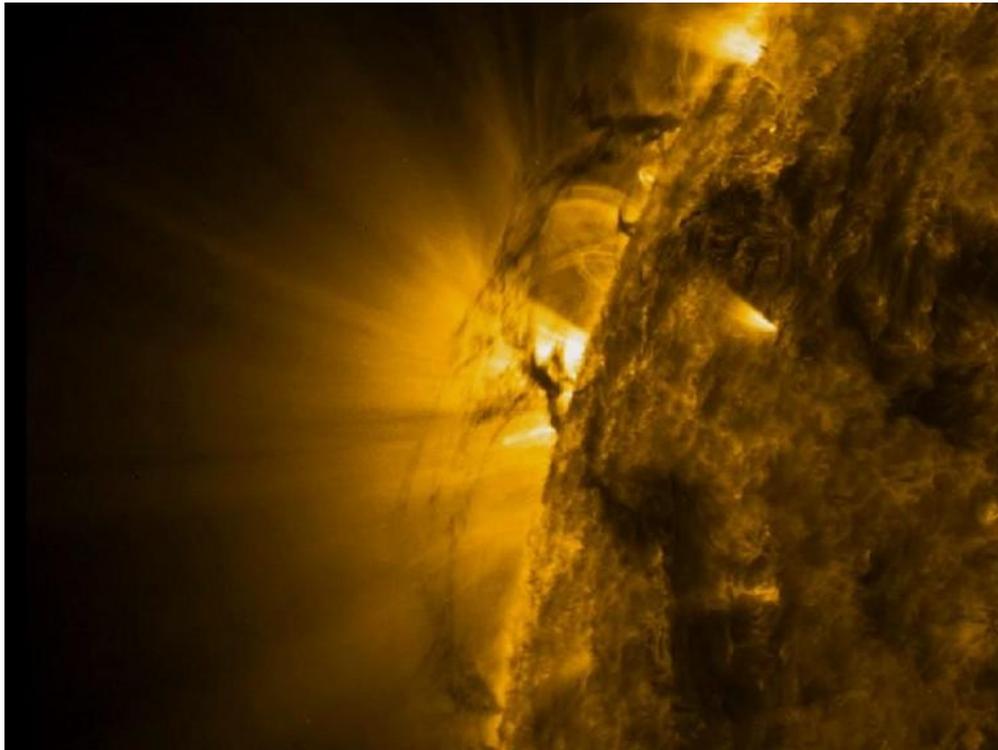
**Figura 6: Le “sentinelle del Sole”, complicatissima rete di satelliti e sonde con il compito di sorvegliare continuamente la nostra stella nel tentativo di prevedere l’arrivo di possibili disturbi di forte intensità. (Cortesia: washingtonpost.com)**

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.

Per finire, vorrei farvi capire perché ho deciso di scrivere questo lunghissimo articolo, ringraziandovi della pazienza per averlo letto tutto fino qui. Qualche tempo fa (primi giorni di Aprile 2012), un sito Internet ha riportato la seguente strabiliante notizia:

*“...ci presenta il video di una tempesta solare grande cinque volte la Terra, che “ronza” sulla superficie della nostra stella. Lo spettacolo è stato reso pubblico dalla Nasa, la quale ha comunicato che i venti scatenati dal tornado solare andavano a una velocità di 300 mila chilometri orari. Giusto per fare un paragone, sulla Terra la velocità più alta mai registrata per una raffica di vento è di 483 chilometri orari. La temperatura della tempesta era di 2 milioni di gradi celsius. Altro che uragano!”*

Il tutto corredato da questa immagine:



***Figura 7: Un normalissimo loop coronale spacciato per “tornado solare”.***

***Fonte: <http://www.giornalettismo.com/archives/228368/il-tornado-solare-grande-cinque-volte-la-terra/>***

Spero che anche a voi che avete pazientemente seguito fin qui la faccenda dello Space Weather venga quantomeno da sorridere... I venti scatenati dal “tornado” non sono movimenti di aria come qui sulla Terra, ma vento solare, quindi fatto di roba solida, particelle. Per di più il voler confrontare la velocità del vento solare con quella di un vero tornado terrestre è un’idea tanto balzana che fa sospettare della sanità mentale di chi l’ha partorita. Per non parlare delle temperature: i due milioni di gradi celsius non ci stanno proprio... Le temperature coronali (peraltro sono chiamate temperature cinetiche ed hanno un significato molto diverso da quello cosiddetto termodinamico di questa grandezza, che è quello a noi familiare) si misurano in Kelvin e la differenza vi assicuro che è notevole. Poi notate la proprietà di linguaggio: “tempesta grande cinque volte la Terra, temperatura della tempesta, tempesta che ronza, (come se fosse un calabrone)...”. Questa non è informazione. È delirio allo stato puro. Poi guardate la foto e ditemi come si fa a contrabbandare per chissà cosa quello che a questo punto riconoscerete, visto che ne abbiamo parlato, come un loop coronale (che per il sole è una cosa normalissima di tutti i giorni, pensate quanti ce ne sono e quanti ce ne sono stati da quando esiste, cioè da quattro o cinque miliardi di anni, e quanti ce ne saranno per un tempo altrettanto lungo).

Se davvero a questo punto state sorridendo (o sghignazzando, il che sarebbe comprensibile), vuol dire che questo articolo non è stato scritto per niente.