Raccolta di articoli di divulgazione sul Sole scritti da Mario Gatti.

Periodo: Marzo 2009 – Aprile 2015

La maggior parte del materiale presentato è pubblicato sulla rivista "Meridiana", organo della SAT (Società Astronomi Ticinesi) e dell'ASST (Associazione Specola Solare Ticinese).

www.astroticino.ch

www.specola.ch

INDICE

1. **Sovrapposizione di cicli di attività del Sole**
2. **La sindrome del Sole**
3. **Il ciclo solare 24: anomalie prevedibili?**
4. **Flare solari**
5. **I numeri del Sole**
6. **Space Weather**
7. **Gli scherzi del Sole**
8. **L'ipotesi di Altrock**
9. **Le Aurore dell'VIII secolo**
10. **Il radio flusso a 10.7 cm.**
11. **Una rettifica e una curiosità**
12. **Macchie stellari**

SOVRAPPOSIZIONE DI CICLI DI ATTIVITA' DEL SOLE

di **Mario Gatti**

Osservatorio Solare, ISIS "Valceresio" – Bisuschio (Varese)

4 Marzo 2009

Abstract

Nell'attività del Sole sono presenti cicli con periodo di 11 anni, nei quali si alternano massimi e minimi di presenza di macchie in fotosfera e di altri fenomeni in diverse zone dall'atmosfera della stella, tutti spiegabili grazie alle proprietà magnetiche del plasma solare. Questo lavoro, rivolto a Studenti di Scuola Superiore che comunque devono avere una certa familiarità con il comportamento dell'attività solare e conoscere i termini specifici necessari, intende illustrare in modo semplice ed esclusivamente fenomenologico, come riconoscere e interpretare eventi che possono accadere in una fase di sovrapposizione (overlapping) tra due cicli, uno avviato alla sua conclusione e l'altro nella sua fase iniziale.

1) Cicli di Attività e magnetismo solare

L'attività del Sole, che ha come fenomeno più facilmente osservabile le macchie in fotosfera, segue cicli semiregolari con periodo di circa 11 anni, come si può notare in figura 1:

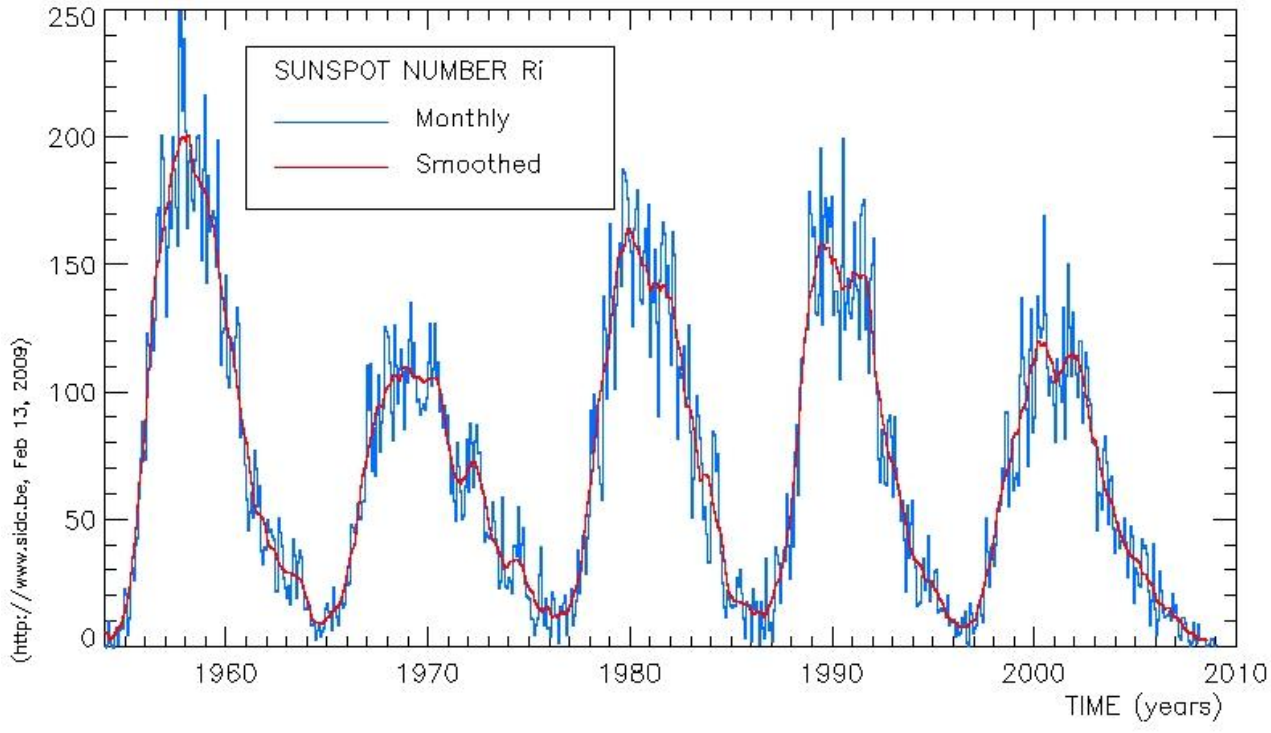


Fig.1 *Il Numero di Wolf, indice dell'attività solare in fotosfera, riportato per gli ultimi 5 cicli solari, dal 1954 al 2008. La linea azzurra indica il valore mensile medio, quella rossa riporta i valori normalizzati. Si noti il notevole valore ottenuto in corrispondenza del massimo del ciclo 19 (1958). Fonte: SIDC – Bruxelles*

Una delle caratteristiche che si ripresenta puntualmente ad ogni ciclo è la tendenza delle macchie, mano a mano che un ciclo avanza nel tempo, a presentarsi prima a latitudini più elevate, poi via via sempre più in prossimità dell'Equatore. Questo vale sia nell'emisfero Nord che in quello Sud della stella. La latitudine media alla quale le macchie si presentano ad inizio di un ciclo è di circa 30°, per poi scendere fino ai 10° di media verso la fine del ciclo.

Questo fenomeno empirico è detto anche *Legge di Sporer*. Riportando in un grafico la latitudine a cui compaiono le macchie in funzione del tempo, si ottiene un caratteristico diagramma, detto *Diagramma di Maunder* o anche *Diagramma a farfalla*. Uno di questi diagrammi per i cicli dal 1980 al 2008 è riportato in figura 2

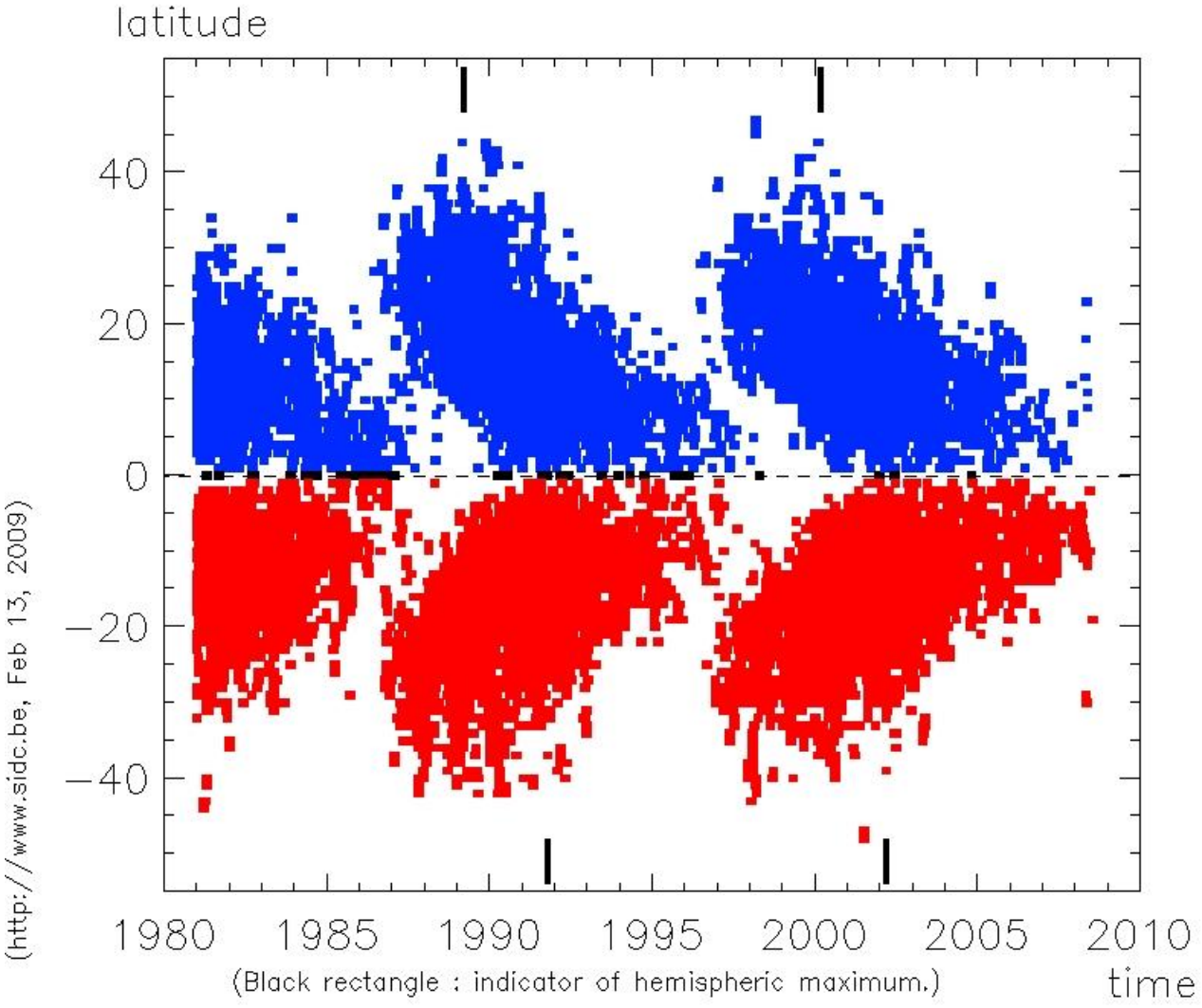


Fig. 2 *Diagramma di Maunder per i cicli 21 22 e 23. Le zone colorate in blu rappresentano le macchie comparse nell'emisfero Nord, quelle in rosso si riferiscono all'emisfero Sud. Si noti la quasi perfetta simmetria nella distribuzione delle macchie tra i due emisferi. Fonte: SIDC - Bruxelles*

Anche le dimensioni delle macchie sembrano avere una certa periodicità. In figura 3 alla pagina seguente sono riportate, in mesv (milionesimi di emisfero solare visibile) le dimensioni delle macchie più grandi osservate nei cicli solari dal 1900 al 2000. Un mesv equivale a 3.047×10^6 Km^2. Si noti l'enorme macchia osservata nel 1947, che tuttora detiene il record di grandezza, 6000 mesv, ossia circa 18 miliardi di Km^2. Il limite di visibilità ad occhio nudo per una macchia è stimato attorno ai 500 mesv. Per una descrizione dei limiti di visibilità teorici raggiungibili con la strumentazione in dotazione all'Istituto si veda "*Limiti di visibilità delle macchie solari*", dello stesso autore di questo testo, Febbraio 2009.

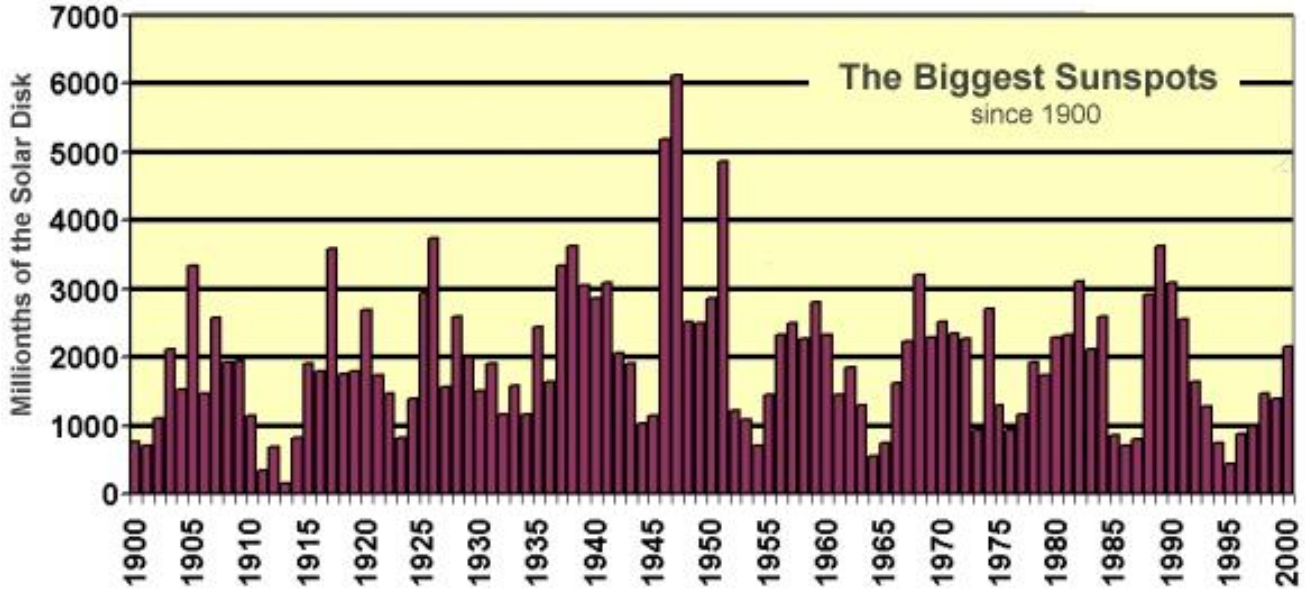


Fig. 3 *Dimensioni delle macchie solari più grandi osservate negli ultimi 100 anni. Fonte: Oss. G.Schiapparelli, Varese*

Lo studio del magnetismo solare ha rilevato che le macchie sono sede di intensi campi magnetici, che possono essere osservati e misurati attraverso *l'effetto Zeeman*, un fenomeno che consiste nella separazione delle frequenze della radiazione (*righe spettrali*) a causa di un campo magnetico esterno. Si osserva che ciascuna riga si scinde in più righe molto vicine, a causa dell'interazione del campo magnetico con la materia. Si ritiene che la presenza del campo magnetico riesca ad inibire i moti convettivi della materia stellare negli strati più profondi di una macchia, che risulta quindi più fredda perché sede di un minor trasporto di energia. Le temperature medie delle macchie sono dell'ordine di 4000 K, contro i 5800 K della fotosfera circostante. Questo conduce ad una riduzione di luminosità (in luce bianca) di un fattore 10, che rende le macchie scure, per contrasto, contro la fotosfera più brillante. In altre parole il plasma solare immerso nel campo magnetico all'interno delle macchie sembra comportarsi come un mezzo termicamente isolante rispetto alla fotosfera.
Nei primi anni del secolo scorso, mano a mano che aumentavano le conoscenze sul magnetismo solare, si individuarono altre regolarità di comportamento dell'attività solare, conosciute come *Leggi di Hale*. La prima legge di Hale afferma che, *in sistemi bipolari di macchie, la macchia che precede ha polarità opposta rispetto alla macchia che segue e che le polarità delle macchie che precedono e quelle che seguono si presentano in modo opposto nei due emisferi Nord e Sud*. La seconda Legge di Hale dice semplicemente che *queste polarità si invertono nei cicli successivi*. Quindi se nel ciclo *n* la macchia che precede ha polarità positiva nell'emisfero Nord e negativa in quello Sud, nel cicli $n + 1$ la macchia che precede ha polarità positiva nell'emisfero Sud e negativa in quello Nord. La macchia che precede presenta sempre polarità negativa a Nord nei cicli di numero pari. Se si tiene conto di questi risultati la ciclicità dell'attività solare presenta un periodo doppio di quello comunemente impiegato, cioè di 22 anni, perché è solo dopo due cicli undecennali che la polarità iniziale viene ristabilita.

Le leggi di Hale, che trovano una spiegazione empirica con l'utilizzo di alcuni risultati teorici conosciuti come *Modello di Babcock* e *Teorema di Alfvén*, sono illustrate in figura 4 alla pagina seguente.

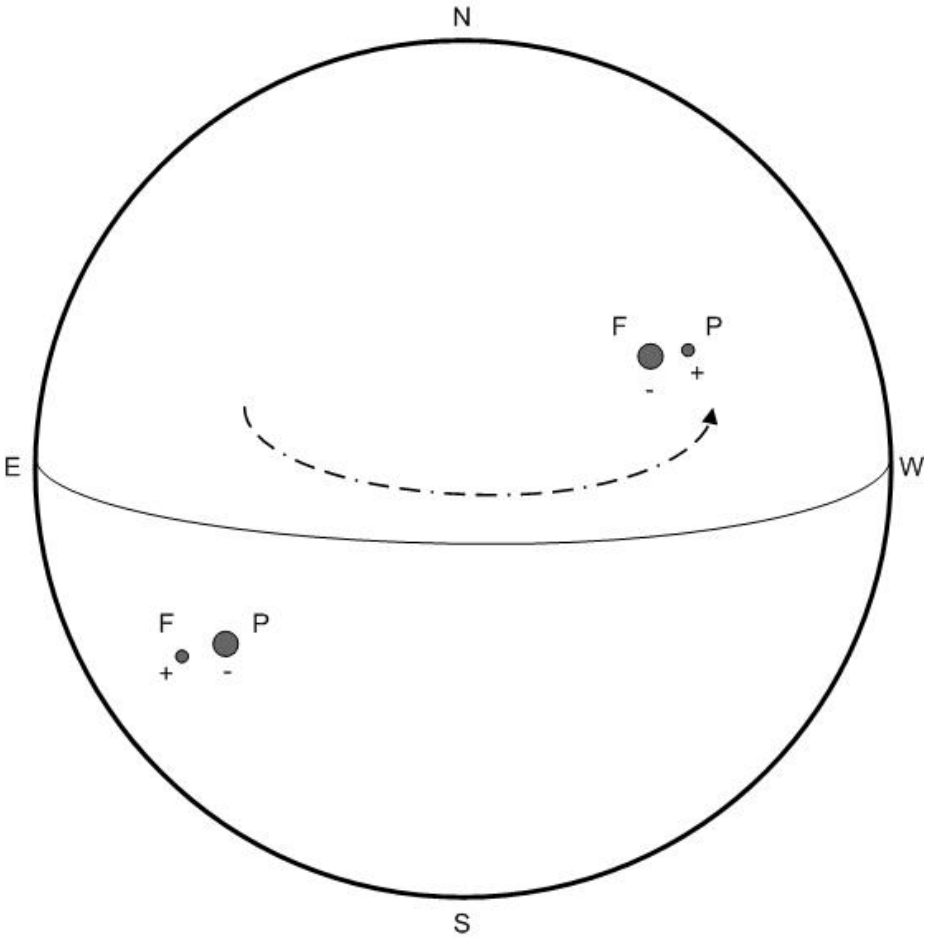


Fig. 4 *Le leggi di Hale: Nei due emisferi del Sole la polarità delle macche che precedono (P, preceeding spot) e di quelle che seguono (F, following spot) è opposta. Questa polarità si inverte nel ciclo successivo dando origine ad un periodo effettivo di 22 anni nell'attività fotosferica.*
Disegno dell'autore (dimensioni delle macchie e del Sole non in scala).

Un strumento potentissimo per esaminare il comportamento magnetico delle macchie è il *magnetogramma*, una sorta di "mappa magnetica" del Sole ottenuta grazie a particolari strumenti detti *magnetografi*. Introdotti in fisica solare intorno al 1950, questi strumenti si basano sull'analisi della radiazione e calcolano un "segnale" che poi viene opportunamente codificato in una scala di grigi, che costituisce appunto il magnetogramma, dove le polarità positive appaiono in colore bianco e quelle negative in colore nero. I magnetogrammi, che hanno apportato contributi notevolissimi alla conoscenza del comportamento magnetico del Sole, hanno però un limite: non permettono di ottenere dati attendibili sulle intensità dei campi magnetici all'interno delle macchie. Queste possono comunque venire calcolate con tecniche che esulano dallo spirito di questo testo e non possono venire illustrate qui. Vengono impiegati per questo scopo dei fattori detti *Parametri di Stokes*, interpretati ed elaborati con una teoria detta del *Trasporto Radiativo*.
Un tipico magnetogramma del Sole intero, come quello riportato in figura 5 alla pagina seguente, si può osservare per esempio grazie allo strumento MDI (Michelson Doppler Imager) operante sulla sonda SOHO. Si riconoscono le polarità positive per le macchie che seguono e negative per quelle che precedono, nell'emisfero Sud. Questa è una caratteristica del ciclo 23 che ci sarà molto utile più avanti.

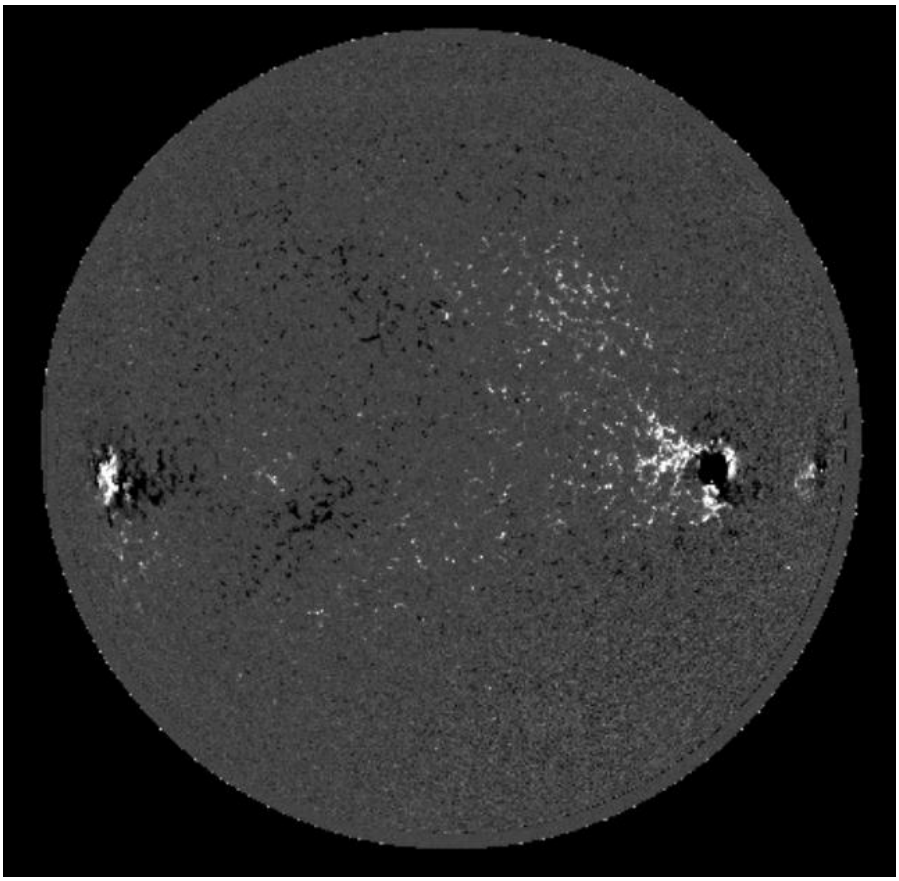


Fig. 5 *Magnetogramma del Sole intero del 4 Maggio 2005. Fonte: SOHO/MID*

2) Sovrapposizione di cicli di attività

La fine di un ciclo di 11 anni e l'inizio di quello successivo non sono fenomeni netti che avvengono, per così dire, da un giorno all'altro. Non è infrequente che alcune macchie di un ciclo in corso si presentino con caratteristiche tali da assegnarle a quello precedente. Chiameremo questo fenomeno *sovrapposizione (overlapping) di due cicli*. Ma come riconoscere queste caratteristiche e quindi affermare che una macchia o un certo gruppo di macchie sono ancora del "ciclo vecchio"? Questa situazione di overlapping è possibile proprio in questi mesi, ed infatti un evento ad essa associato è accaduto proprio lo scorso mese di Febbraio, ma procediamo con ordine.
La prima regione attiva sul Sole che ha portato gli osservatori a ritenere che l'attuale ciclo solare, che porta il numero 24, fosse ufficialmente iniziato è stata vista il 13 Dicembre del 2007. Anche se una definizione ufficiale dell'inizio di un ciclo non esiste, l'esame del magnetogramma non poteva lasciare dubbi: la regione ad elevata latitudine nell'emisfero Nord, che nel magnetogramma di figura 6 è evidenziata dall'ellisse colorata, presentava la configurazione magnetica corretta per attribuire la sua appartenenza al ciclo 24. Infatti le polarità precedenti e seguenti sono le stesse di quelle che si vedono (molto più chiaramente) in un'altra regione nell'emisfero Sud. Questo è in contrasto con la prima Legge di Hale, quindi le due regioni attive sono associate a due cicli diversi.

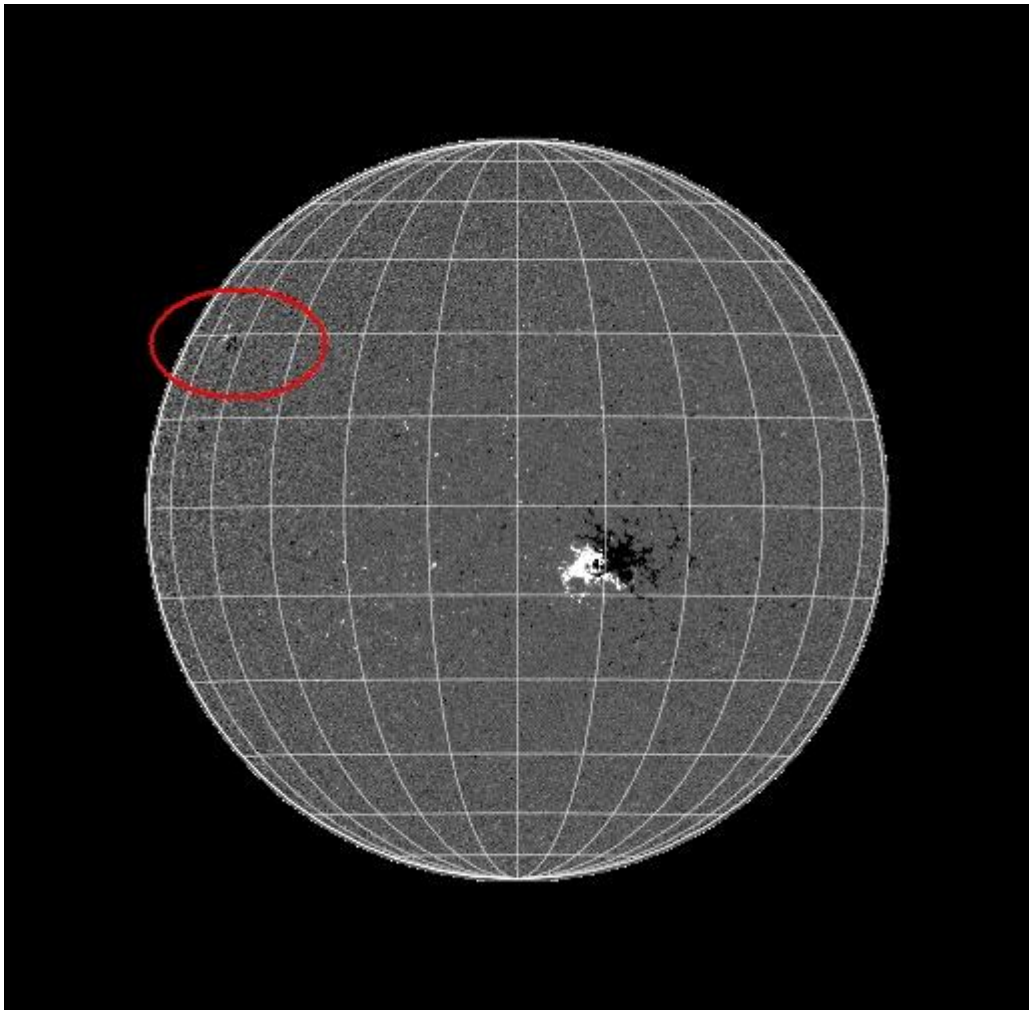


Fig. 6 *Magnetogramma del Sole intero del 13 Dicembre 2007. Si nota chiaramente che la piccola regione attiva evidenziata dall'ellisse colorata nell'emisfero Nord e la grande regione visibile in quello Sud presentano le stesse caratteristiche di polarità. E' la nascita del ciclo 24. Fonte: SIDC - Bruxelles*

Anche se la regione attiva osservata nell'emisfero Nord non aveva controparte fotosferica, cioè ad essa non erano associate macchie ed anche se la comparsa di una macchia o di un gruppo aventi le giuste caratteristiche magnetiche ma isolati nel tempo può essere una "falsa partenza" di un ciclo, che deve essere supportata dal susseguirsi di una sequenza di eventi, le osservazioni del Dicembre del 2007 e soprattutto del Gennaio 2008 hanno sancito la nascita ufficiale dell'attuale ciclo solare numero 24, il cui massimo è previsto tra il 2011 ed il 2012 e per il quale si alternano pareri contrastanti, tra chi ritiene che sarà il più attivo degli ultimi 100 anni e chi prevede che il Sole non si mostrerà particolarmente "agitato" nei prossimi anni. Staremo a vedere e passiamo ad esaminare un caso concreto di overlapping tra cicli.

3) La sovrapposizione del mese di Febbraio 2009

Alla luce di quanto visto fin qui, vediamo ora di capire come è stato possibile attribuire al precedente ciclo 23 un piccolo gruppo di macchie comparso il 12 Febbraio 2009 nell'emisfero Sud, a 6° di latitudine Sud e 31° di longitudine Est, associato alla regione attiva NOAA 11012. La regione aveva un'estensione di appena 10 mesv e presentava un gruppo di tipo A (Classificazione di Zurigo) con una sola macchia, le dimensioni della quale (inferiori ai 5000 Km.) non consentivano certo la sua osservazione con gli strumenti in dotazione all'Istituto. Ma l'esame del

magnetogramma ci viene in aiuto. Nella figura 7 è riportato il magnetogramma relativo alla regione attiva NOAA 11012 e si vede che la polarità della parte che precede è negativa mentre quella della parte che segue è positiva. Questa, come abbiamo detto in precedenza e come si vede nelle figure 5 e 6 è una caratteristica magnetica del ciclo 23.

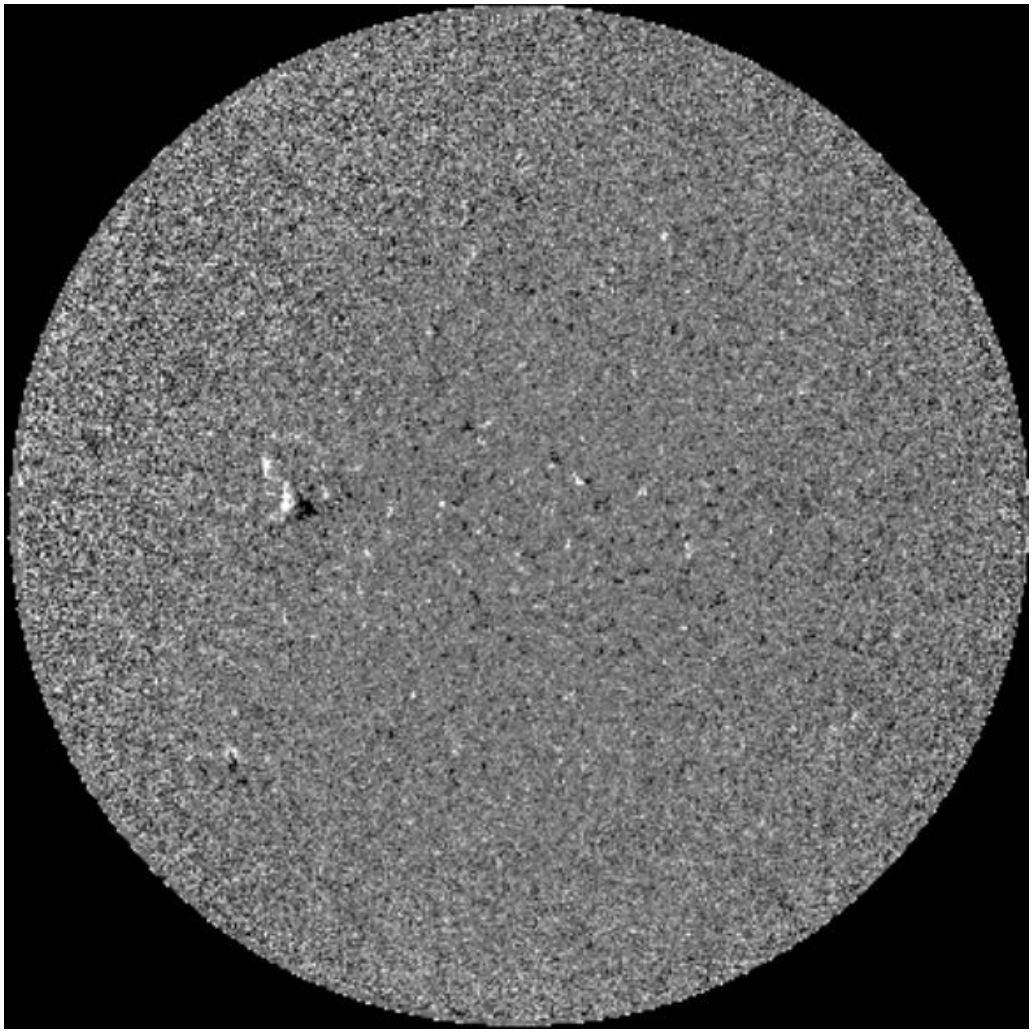


Fig. 7 *Magnetogramma del Sole intero relativo alla regione attiva NOAA 10112 del 13 Febbraio 2009. Si notano chiaramente il bianco a sinistra ed il nero a destra, che rappresentano la sequenza di polarità caratteristica del ciclo 23 nell'emisfero Sud. Fonte: SOHO/MID*

In precedenza, e precisamente il 9 Gennaio 2009 un'altra regione attiva, la NOAA 11010 è stata osservata nell'emisfero Nord, inizialmente a 18° di latitudine Nord. Alla regione era associato in fotosfera un gruppo di tipo B che si è evoluto fino ad un massimo di 6 macchie (osservazioni della Specola Solare Ticinese di Locarno), anche queste di dimensioni molto al di sotto del limite di risoluzione dei nostri strumenti e quindi non osservabili otticamente in Istituto. Nella regione sono state presenti macchie fino al 12 Gennaio (poi è diventata *spotless*, quindi senza controparte fotosferica) ed il magnetogramma ad essa relativo mostra, ma nell'emisfero opposto a quello in cui sarebbe poi comparsa la NOAA 11012, la stessa situazione di polarità: negativa per la parte precedente e positiva per quella seguente. Basta applicare ancora una volta le leggi di Hale per attribuire a questa regione attiva l'appartenenza al ciclo 24. Il magnetogramma in questione è riportato in figura 8 alla pagina seguente.

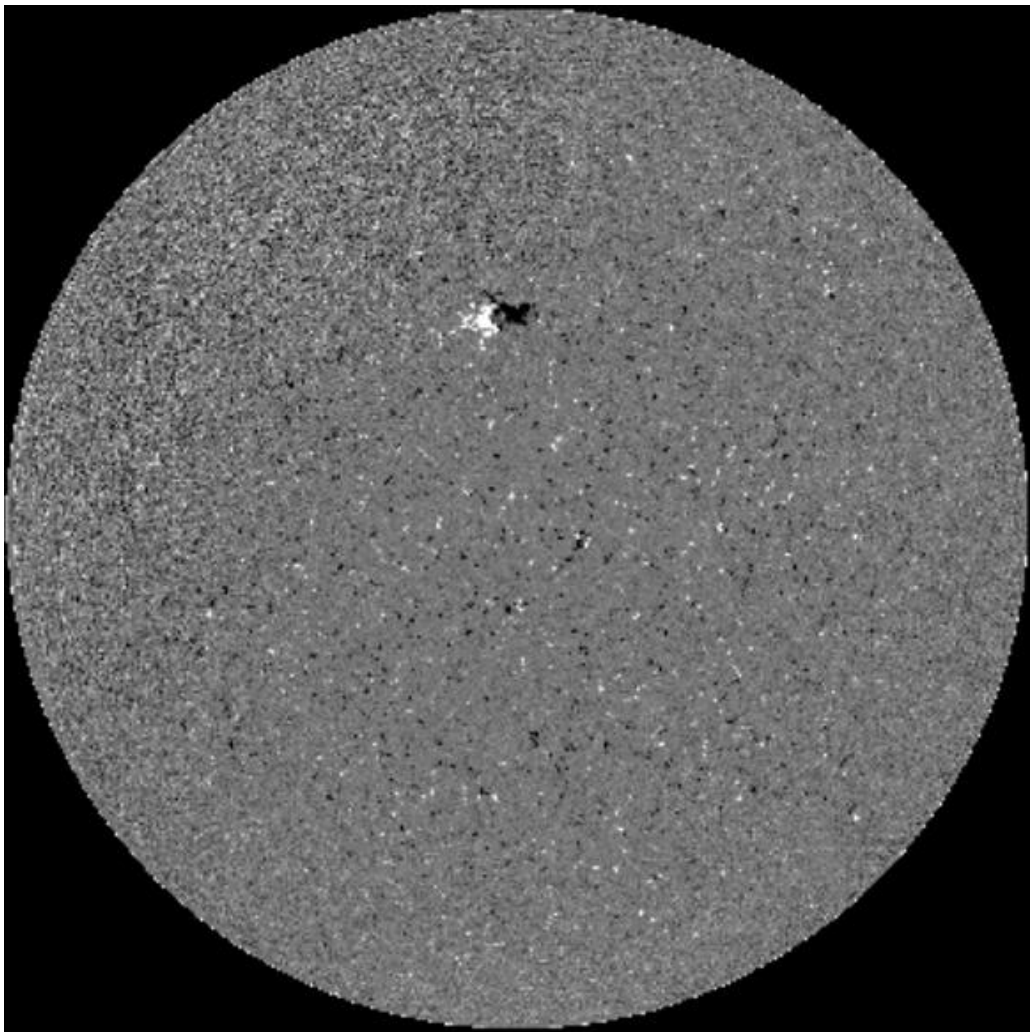


Fig. 8 *Magnetogramma del Sole intero relativo alla regione attiva NOAA 11010 del 12 Gennaio 2009. La polarità del gruppo è identica a quella della figura 7, ma nell'emisfero opposto, quindi i due gruppi appartengono a due cicli diversi, il 23 ed il 24.Fonte: SOHO/MID*

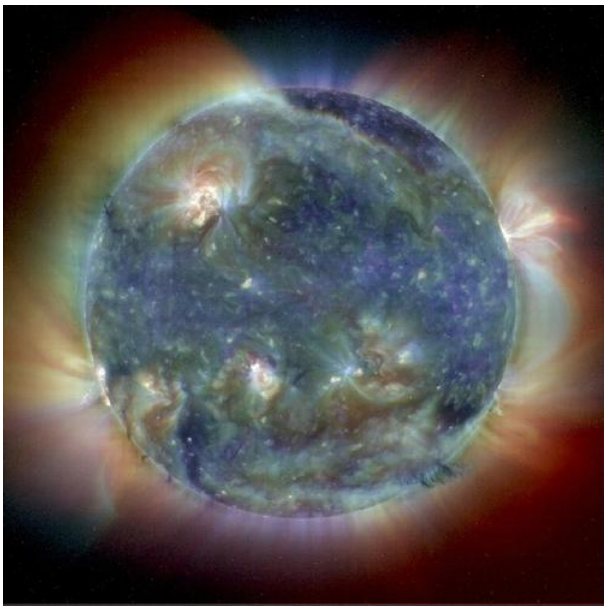
Tra queste due regioni se ne è presentata un'altra, sulla quale sono state osservate due macchie in un gruppo di tipo B solo il 19 Gennaio, anch'essa attribuibile al ciclo 24 per le caratteristiche di polarità presentate.

4) Conclusioni

E' facile, ma solo grazie all'aiuto dei magnetogrammi, risolvere questioni di appartenenza di macchie e gruppi ad un ciclo piuttosto che ad un altro in situazioni di overlapping, come quella descritta in precedenza e che potrebbero anche ripetersi in questi mesi di passaggio tra due cicli. L'attuale ciclo 24 presenta le seguenti caratteristiche di polarità: nell'emisfero Nord negative le macchie che precedono, positive quelle che seguono; nell'emisfero Sud, ovviamente, il contrario per la prima legge di Hale. Qualunque osservazione che presenti la situazione opposta permette di attribuire l'attività della fotosfera al precedente ciclo 23.

La Sindrome del Sole

Considerazioni, tra il serio e il faceto, sul perché e sul come osservare il Sole da malati, cioè con occhi diversi da quelli della sana gente comune.

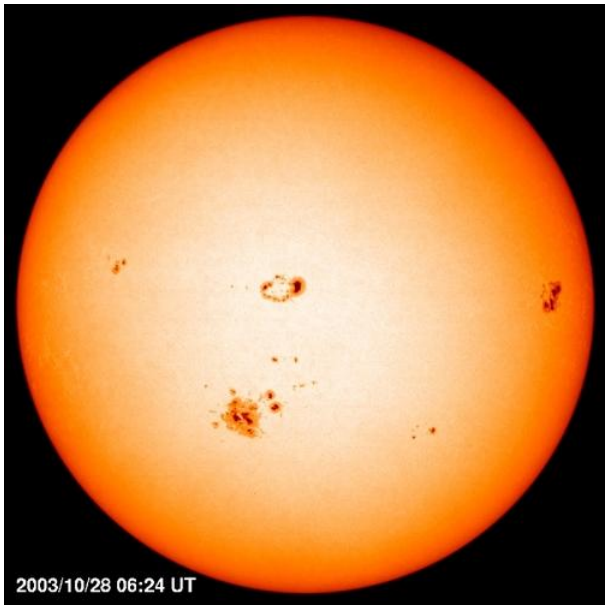


di Mario Gatti

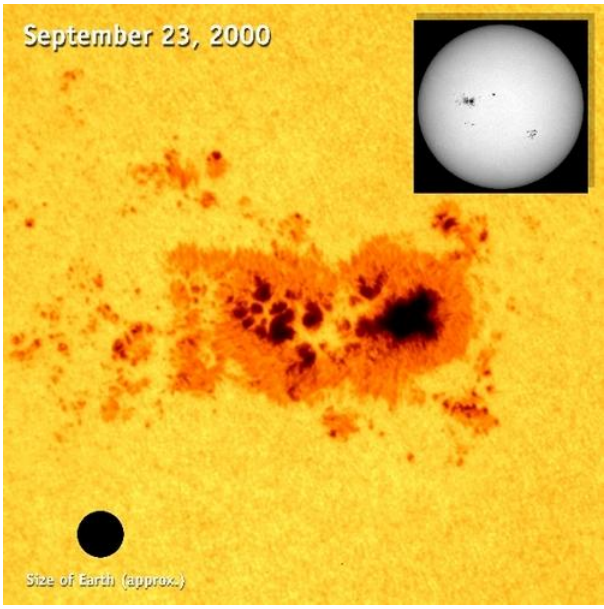
Questa è una storia che parte da lontano. Quand'ero bambino, quindi circa quattro cicli solari fa (fermi, non smettete subito di leggere dandomi del matto, abbiate fiducia e proseguite… perché vuol dire più o meno quasi mezzo secolo fa), mio padre mi regalò un libro di astronomia, o meglio di divulgazione astronomica, come diremmo giustamente noi oggi.

Tra le tante cose belle che erano scritte, disegnate e (più raramente) riprodotte fotograficamente in quel libro, quella che mi colpì di più fu un disegno che illustrava la cosiddetta "teoria del sigaro", cioè il fatto che le dimensioni dei pianeti del sistema solare prima aumentano, fino alla Terra e (quasi) a Marte, poi ancora di più verso i giganti gassosi Giove e Saturno, anche se allora nessuno azzardava nemmeno l'idea che non fossero solidi, per poi tornare a diminuire verso quelli più esterni, Urano, Nettuno e infine il povero Plutone, allora considerato pianeta a tutti gli effetti e ora ridotto a semplice intruso del nostro bel sistema. Quell'immagine mi affascinava nel suo insieme, ma ciò che colpì più di tutto l'immaginazione di quello che allora era un bambino di circa sette anni era quella cosa disegnata al centro del sistema: un globo arancione circondato da un'aura gialla e tanti effetti speciali, realizzati magistralmente da colui che fece quel disegno tanto artistico quanto, probabilmente, più vicino alla realtà molto più di quanto lui stesso immaginasse. Insomma, di tutta la compagnia quello che io avevo notato più di ogni altro era lui, il Sole. Ma la cosa passò e si fermò lì, se non per il fatto di aver acceso nella mia mente un interesse e una passione che si sarebbero poi risvegliati diversi anni più tardi.

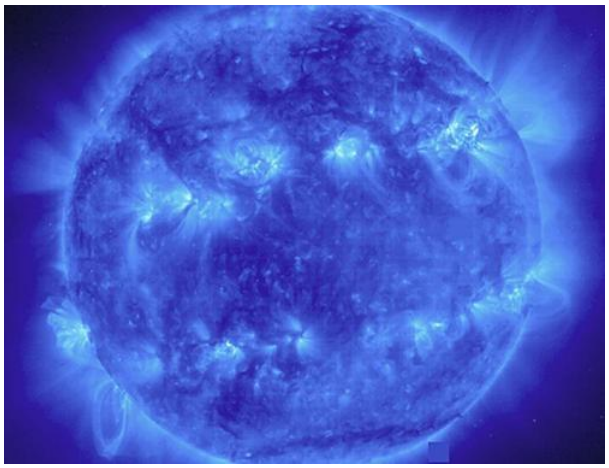
Da allora tutto quello che riguarda il cielo, le stelle, i pianeti e altra mercanzia del genere mi ha sempre affascinato e interessato, ma il germe della malattia che mi avrebbe colpito molto dopo era ancora in incubazione e non mostrava alcun sintomo. Molti anni dopo, anni di sacrifici, di fatica e di studi che mi hanno portato a capire (forse, ma non ne sono poi così sicuro) tante cose in più di quello che vedevo su quel disegno tanto tempo prima, mettendo da parte un po' alla volta i quattrini necessari (tanti, per quel tempo), feci il grande passo e mi comprai un binocolo astronomico 20x80 con un supporto stativo che pesava diversi chili ma assicurava una grande facilità di puntamento e di utilizzo dello strumento e soprattutto una grande stabilità. La prima volta che lo puntai verso il cielo fu per vedere Saturno, e rimasi incredulo nel riuscire a vederne gli anelli, cosa che non avrei mai creduto possibile senza un telescopio "vero". E da allora via, chi più ne aveva ne metteva: Giove e i suoi satelliti galileiani, con la loro danza frenetica intorno al gigante, molti e begli oggetti *deep sky*, davvero più intuibili che realmente visibili… ma volete mettere la soddisfazione di andarli a cercare, e spesso trovare, così a occhio, senza coordinate, cerchi, motori, cercatori e via discorrendo? Furono mesi, anzi anni, di notti insonni passate attaccato al mio strumento, guardando e riguardando tutto quel ben di Dio.



Finché non una notte, ma un giorno, mi venne la balzana idea di provare a proiettare il disco solare su un pezzo di cartoncino bianco incollato su un muro dietro il binocolo. Era il 1989, e in quell'anno il Sole si stava preparando a vivere uno di quei suoi periodi di stella scalmanata che noi chiamiamo "massimi di attività". Vedere su quel cartoncino quel doppio disco luminoso (doppio visto che non avevo tappato uno dei due obiettivi del binocolo) tutto trapuntato di macchioline scure più o meno grandi fu probabilmente quello che svegliò il germe che dormiva da tanto tempo, da quel giorno di tanti anni prima, quando il bambino aveva visto quel disegno sul libro con la palla arancione al centro.



E così esplose quella che si chiama Sindrome del Sole, detta anche Febbre G2 dal tipo spettrale della stella (mi piacerebbe chiamarla febbre gialla, ma quella è una brutta malattia che esiste davvero ed è meglio non prendersela, visto che è potenzialmente fatale). Il sintomo principale di questa malattia è quello di non poter fare a meno di guardare il Sole per vedere cosa c'è su, di continuare a pensare se ci saranno o no le macchie, se stia combinando qualche accidente di esplosione da qualche parte i cui effetti, dopo qualche giorno, potrebbero arrivare qui da noi e darci qualche fastidio o semplicemente, per quei fortunati che vivono alle giuste latitudini, darci modo di osservare splendide aurore, effimere illusioni dell'arrivo di un'alba che non c'è.



Il contagio era serio: dopo un po' non mi bastò più proiettare il disco solare sul cartoncino. Volevo vederlo, vederlo davvero. Un discreto numero di pezzi di pellicola fotografica esposta, un bel po' di nastro adesivo, ed eccolo qua, il filtro solare autocostruito a costo zero. Una volta appiccicato il rudimentale aggeggio in qualche modo a uno dei due oculari del binocolo, stavolta dopo aver tappato l'altro, la visione fu indimenticabile: un disco solare di un colore indescrivibile, tra il blu e il viola, e soprattutto loro, le macchie, belle visibili e osservabili in tutta calma e tranquillità. Nessun problema agli occhi, né sensazioni di accecamento, di calore, niente. Ero felicissimo.

Poco più di 20 anni dopo, un chirurgo oftalmico avrebbe rimosso una bella cataratta nucleare dal mio occhio destro, mettendo una splendida protesi al posto del mio cristallino ormai ridotto a una massa grigiastra. Il medico mi avrebbe detto poi che la cataratta era probabilmente congenita, ma che l'aver osservato il Sole per tanto tempo, in quel modo praticamente suicida, aveva convogliato

tanta di quella radiazione nell'occhio, anche se io ovviamente non me ne accorgevo, al punto tale che non si sentiva di escludere del tutto che la comparsa, più o meno a 40 anni, di un disturbo che di solito affligge le persone in età senile fosse proprio dovuto a quello: esistono infatti le cosiddette cataratte da calore, prodotte dall'accumulo di radiazione nell'occhio.

Ed ecco che possiamo cominciare a trarre qualche morale dalla storia (per fortuna non sulla mia pelle, perché, se quello che supponeva il medico era vero, mi sento un miracolato a essermela cavata con così poco, in fondo): il Sole va guardato con intelligenza e nei giusti modi, senza ricorrere a strani marchingegni fai-da-te, tipo vetri affumicati, bacinelle con il fondo scuro, pellicole come avevo fatto io eccetera. Il Sole può diventare un vero e proprio killer della vista. Per questo non va mai guardato direttamente senza proteggere adeguatamente gli occhi, o con strumenti ottici come i telescopi, senza utilizzare i giusti mezzi.

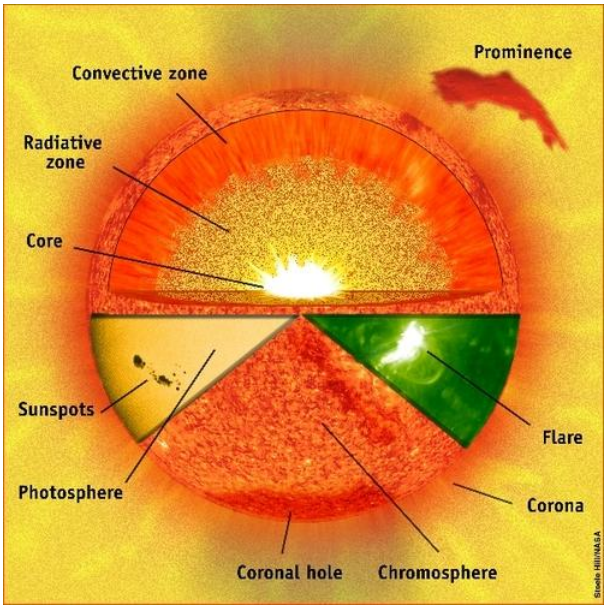
Per l'osservazione "a occhio libero", voglio dire senza strumenti, per esempio in caso di eclissi o semplicemente per vedere il sorprendente spettacolo della fotosfera rotonda e arancione, come una moneta di rame splendente, il miglior supporto sono i cosiddetti "occhialini da eclisse". Si tratta di pezzetti di un materiale chiamato Mylar, che ha una capacità estrema di assorbire calore e radiazione solari, non solo nel visibile ma anche in altre parti dello spettro, come l'infrarosso e l'ultravioletto, che scaldano e "cuociono" gli occhi senza che nemmeno ce ne accorgiamo. Certo, questi occhialini non sono l'ultimo grido in fatto di estetica: ben lontane dall'assomigliare a quelle di D&G o dei Ray-Ban, le loro semplici montature sono in cartone, di sicuro poco eleganti, ma di bassissimo costo e facile reperibilità presso qualunque negozio di ottica o di strumenti astronomici.

Quelli di cui invece si deve diffidare sono i cosiddetti "filtri solari", di solito forniti in dotazione assieme ai telescopi di fascia medio-bassa: piccoli pezzi di vetro scuro avvitabili direttamente sugli oculari. Il rischio di questi aggeggi è enorme: se esposti troppo a lungo al calore, per esempio se uno vuole divertirsi a osservare e magari conteggiare tante macchie solari, possono anche spaccarsi di colpo. Se questo succede, il malcapitato osservatore rischia di non fare nemmeno in tempo ad allontanare l'occhio dall'oculare prima di averne ricevuto quanto meno una bella ustione corneale (curabile e guaribile, sì, ma con tempo e dolore), sperando che il danno non sia alla retina, nel qual caso le macchie si trasferiscono per sempre dal Sole all'interno dell'occhio della vittima. Qualcuno consiglia di rompere e buttar via questi cosi prima ancora che venga la tentazione di usarli. Concordo in pieno.

Diverso è il discorso dei filtri da montare davanti all'obiettivo dei telescopi, quindi all'"ingresso" della luce nello strumento, di solito fatti con un doppio strato di Mylar metallizzato a specchio da entrambi i lati. Questi filtri, detti "a tutta apertura" proprio perché devono rispettare le dimensioni di apertura dello strumento, sono assolutamente sicuri ma hanno il difetto del costo (non sono carissimi ma nemmeno del tutto a buon mercato), sono delicatissimi e vanno sostituiti dopo un po', specialmente se usati spesso e se subiscono qualche piccolo colpo o si rovinano e si graffiano anche solo leggermente in superficie. Inoltre vanno puliti usando un detergente specifico (alcool isopropilico), con molta cura e delicatezza, pena il rischio di rovinarli irrimediabilmente.

Il metodo più sicuro per osservare il Sole rimane comunque quello della proiezione diretta dell'oculare. Certo per catturare dettagli fini, come piccole macchie, facole in fotosfera o i cosiddetti pori (opacità della fotosfera di dimensioni al limite delle macchie più piccole e di morfologia meno strutturata), ci vogliono strumenti di lunga focale, possibilmente collocati in un ambiente oscurato. Se questo non è disponibile, è indispensabile "fare ombra" dietro allo strumento, altrimenti non si vede un accidente, nemmeno il Sole, e si perde tutto nella luce diffusa.

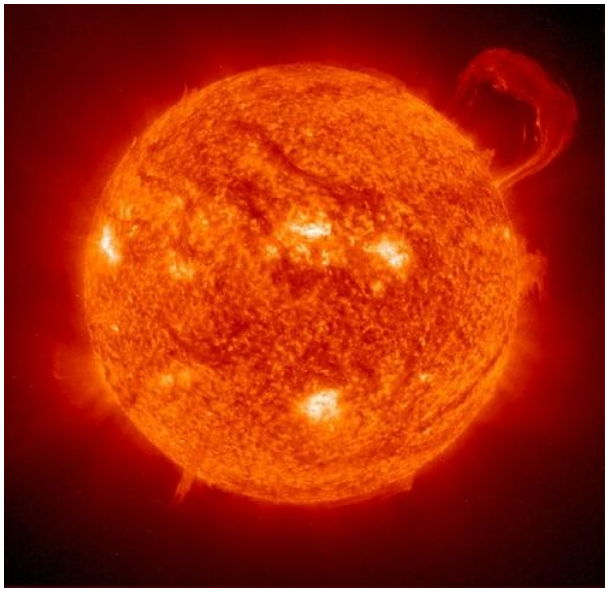
Anche qui non mancano i rischi, fortunatamente non per gli occhi questa volta, ma per gli oculari. La maggior parte di quelli in commercio (parlo di quelli di prezzo accessibile alle tasche della maggior parte di noi) hanno parti in plastica al proprio interno, che si sciolgono come la neve se lasciati sotto l'azione del Sole, specialmente per tempi lunghi o anche per poco, magari in tarda primavera, estate o inizio autunno, quando il soleggiamento è di solito intenso. Per ovviare a questi inconvenienti (pericolosi per il portafogli dell'osservatore solare medio) o si fanno le osservazioni alle 7h30 del mattino, sempre se non ci sono le nuvole che poi se ne vanno puntualmente solo verso mezzogiorno, o si deve diaframmare opportunamente l'obiettivo dello strumento. Per esperienza personale (ho fuso diversi oculari, e le conseguenze economiche sono sempre state poco piacevoli) un riflettore da 114/900 di tipo Newton va diaframmato almeno a 50 mm, un rifrattore da 90/1000 almeno a 60 (meglio se a 40), un catadiottrico Maksutov-Cassegrain da 150/1800 a 40 mm. Così gli oculari dovrebbero salvarsi. Certo la definizione dell'immagine in proiezione si abbassa di pari passo con la chiusura dell'obiettivo. Si deve scegliere quindi se privilegiare l'osservazione dettagliata delle macchie o salvare l'oculare e il portafogli. Purtroppo ormai sono quasi irreperibili, sempre nella fascia di prezzi accessibile, gli oculari cosiddetti “non cementati”, come gli Huygens, che non danno questi problemi.



Ma torniamo un attimo alla Sindrome del Sole. La maggior parte della gente viene attratta da altri oggetti celesti, come i pianeti, la Luna, le galassie, le nebulose, gli ammassi… Se sanno che uno è appassionato di queste cose spesso gli fanno domande, anche complicate, come è giusto che sia, aspettandosi delle risposte possibilmente sensate. Il “malato del Sole” attacca la risposta (e se non la sa si inventa qualcosa di plausibile), ma prima o poi riesce a dirottare il discorso su quello che interessa a lui, non a chi ha posto la domanda. Ad esempio, non è difficile, per un vero malato, spostare l'attenzione dell'interlocutore da Giove al Sole: basta far notare che il primo non è diventato una stella e l'altro sì per una banale questione di massa iniziale. Una volta arrivato al Sole, il malato non si ferma più: parte a discorrere di fotosfera, temperatura, protuberanze, flare, nucleo, rotazione differenziale, tacochline, campi magnetici, emissioni coronali, vento solare, tempeste magnetiche… Ecco perché il malato di Sole è essenzialmente un personaggio schivo e solitario, abituato a stare per i fatti suoi, in compagnia solo della sua stella preferita. Perché la gente normale di fronte a lui (e a tutte le questioni che tira in ballo) gira i tacchi e se ne va dicendo: “Io ti avevo fatto un'altra domanda, ma chi te le ha chieste tutte ‘ste cose?”. A meno che non si incontri un altro malato grave, questo è quello che succede normalmente.

Insomma, il Sole è cosa per pochi. La maggior parte della gente non si interessa a lui, anche se appassionata di cose del cielo. Di solito interessa di più (e lo capisco benissimo) quello che si vede di notte, cioè tanto, per non dire tutto, piuttosto che quell'unica cosa che si può vedere di giorno, oltre tutto a rischio della vista se non si ricorre a un sacco di diavolerie complicate. Il malato di Sole sa invece che è proprio tutto il contrario: è vero che di notte si vedono tante cose, ma sono quasi sempre uguali tutte le volte che si guardano, fatta eccezione magari per le stelle variabili, che però non sono proprio la cosa più semplice da osservare, mentre il Sole non è mai lo stesso, ogni giorno può apparire molto diverso dalla volta precedente, e spesso anche più volte nel corso della stessa giornata.

La Sindrome del Sole è un po' come la malaria o la brucellosi (febbre maltese) prima dell'avvento di chinino, sulfamidici e antibiotici. Quando te la prendi non guarisci più. Però va a cicli proprio come le febbri tropicali e le macchie solari, e anch'io non sono sfuggito a questi sintomi: la malattia si è assopita per un po' di anni, poi da qualche tempo è riesplosa in tutta la sua forza, al punto da portarmi a trascinarla addirittura dentro il mio lavoro, nella vita di tutti i giorni. Da quasi un anno e mezzo nella scuola dove lavoro, l'Istituto Statale di Istruzione Superiore di Bisuschio, in provincia di Varese, ha preso il via un progetto di osservazione del Sole piuttosto articolato, che non solo mi permette di curare i sintomi del male osservando il Sole tutti i giorni che Dio manda sulla Terra (perlomeno quelli senza nuvole), ma, contrariamente alla caratteristica solitaria di cui si parlava prima, molto spesso in buona compagnia: quella degli studenti e delle studentesse che dedicano il loro tempo al Sole, devo dire con ottimi risultati per loro e grande soddisfazione per me. Chissà che qualcuno o qualcuna di loro non sia già stato contagiato dalla Sindrome…



La ricaduta della malattia mi ha fatto mettere mano anche al salvadanaio: mi sono comprato un Maksutov-Cassegrain da 150/1800 identico a quello che usiamo a scuola, così posso alternare le osservazioni anche a casa, con tanto di filtri in Mylar a tutta apertura che ovviamente non potevano mancare. Lavorando in osservazione diretta con il filtro con un oculare da 17 o da 10 mm oppure in proiezione (così non fonde niente) con un oculare Zeiss da 40 senza parti in plastica, è possibile arrivare a vedere anche le macchie più piccole, associate a regioni attive di pochi mesv (un mesv, milionesimo di emisfero solare visibile, è un'unità di misura di superficie usata in fisica solare e corrisponde a circa 3 milioni di chilometri quadrati). Poi, visto che il Sole non finisce con la fotosfera, non poteva mancare un telescopio H-alfa per l'osservazione delle protuberanze in cromosfera. E così è arrivato in casa (anche se di fatto risiede a scuola a disposizione dei miei ragazzi, oltre che mia) il Coronado PST 40/400, piccolo telescopio dalle grandi prestazioni, con il quale si osservano (e si fotografano, anche se con qualche difficoltà) anche le più piccole protuberanze, con grandissima soddisfazione e relativo abbassamento della Febbre G2. Tutto questo mi permette di curare la Sindrome dando un'occhiata alla stella tutti i giorni quando è possibile, registrando dati e facendo un disegnino della fotosfera e delle protuberanze in cromosfera. La gravità della malattia mi ha portato anche a costruire e tenere aggiornato quotidianamente il sito SolarSpots, nel quale si possono trovare informazioni, news, link, materiali didattici, disegni e fotografie.

Il prossimo passo (il male si aggrava col tempo) sarà l'acquisto di un altro Coronado, quello chiamato CaK, per l'osservazione del Sole nelle cosiddette righe K del Calcio ionizzato in cromosfera. Il fatto è che queste frequenze sono tanto viola da essere praticamente ultraviolette (sono intorno ai 3.800 Angstrom), quindi questo non è un telescopio pensato per guardarci dentro (come quello con il filtro H-alfa), perché non si vede praticamente niente, ma è necessario una CCD, o al limite una buona webcam astronomica interfacciata con un computer, per poter osservare dei buoni calciogrammi. Se qualcuno è interessato, il prezzo di questi telescopi solari si aggira intorno ai 750 euro, ma si deve mettere in conto anche l'acquisto di un buon cavalletto di tipo fotografico sul quale montarli, che abbia una testa basculante per ammortizzare le vibrazioni. Un cavalletto del genere costa intorno ai 220-250 euro. In alternativa è possibile usarli (alla stregua di guide fuori asse) su telescopi che dispongano di un attacco di tipo fotografico, in parallelo all'ottica

principale: per esempio il rifrattore Konusmotor 90/1000 offre questa possibilità. Il vantaggio in questo caso è che si potrebbe disporre dell'eventuale motorizzazione del telescopio, cosa ovviamente non disponibile con l'utilizzo del semplice cavalletto fotografico.

Per concludere, la malattia, una volta presa, si cura con l'assunzione regolare, giornaliera, di un farmaco dispensato gratuitamente senza ticket sanitari: l'osservazione del Sole. Io penso di essere molto fortunato soprattutto perché lo posso fare sia per hobby sia per lavoro (che è una gran bella cosa e non capita a tutti). Per questo credo di dover ringraziare quelli che ormai sento come dei veri amici, cioè coloro che lavorano alla Specola Solare Ticinese di Locarno Monti e che, oltre ad assicurare supporto e assistenza preziosissima a me e ai ragazzi nell'ambito della nostra attività astronomica solare scolastica, ad averci prestato l'oculare da 40 mm per le osservazioni in proiezione e ad averci insegnato tante cose, mi hanno permesso di lavorare al loro fianco la scorsa estate e di utilizzare il rifrattore da 150 mm della Specola. Anche se in quei giorni l'amico Sole non si è degnato di mostrare nemmeno una macchia per oltre un mese, aver potuto utilizzare un vero telescopio solare e, soprattutto, aver potuto lavorare a stretto contatto con persone di grandissima esperienza e capacità in questo settore è stata senza dubbio un'esperienza che non dimenticherò mai.

Coadiuvanti nella terapia sono i numerosi siti Internet che permettono di monitorare l'attività del Sole attraverso dati e immagini provenienti (a volte in tempo reale) da Osservatori terrestri o spaziali in orbita intorno al Sole. Consultarli parallelamente all'osservazione diretta con i telescopi porta a una notevole attenuazione dei sintomi. Non voglio far torto a nessuno riportandone qui alcuni e magari dimenticandone altri. Rivolgetevi al vostro farmacista di fiducia, cioè al vostro motore di ricerca preferito, che saprà consigliarvi in merito ai loro indirizzi e al loro utilizzo.

Cortesia immagini: SOHO/ESA/NASA

Ciclo Solare 24: anomalie forse prevedibili

di **Mario Gatti**

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

6 Aprile 2010

Abstract

L'attuale Ciclo Solare presenta una fase di minimo prolungato in avvio che non è stata riscontrata da tempo in quelli precedenti. I modelli previsionali, peraltro contrastanti, che parlavano prima di un ciclo particolarmente intenso e poi di uno di debole intensità, sono stati al momento praticamente tutti disattesi. Per questo possiamo affermare di essere di fronte ad un ciclo anomalo. Eppure questa anomalia, analizzando attentamente alcune caratteristiche dei cicli solari avvenuti nel passato ed accuratamente studiati, potrebbe non apparire poi così inattesa. Questo lavoro, senza alcuna pretesa di costituire a sua volta un possibile modello previsionale, passa in rassegna alcuni dati fondamentali alla luce dei quali è possibile rendere forse conto dell'andamento del ciclo attuale.

1) La nascita del Ciclo 24

La prima Regione Magnetica Bipolare (BMR, Bipolar Magnetic Region, tanto per usare i consueti acronimi anglosassoni) compatibile con un ciclo di indice pari secondo le leggi di Hale (polarità precedente negativa nell'emisfero Nord del Sole), è stata osservata il 13 Dicembre del 2007 a poco meno di 30° di latitudine Nord. Non ha prodotto macchie quindi non è stata mai numerata dal NOAA (il National Oceanic and Atmospheric Administration, che dal 1972 effettua il conteggio progressivo delle Regioni Attive), per cui la "nascita ufficiale" del ciclo è stata posticipata di qualche settimana, quando, intorno al 4 Gennaio del 2008, è stata rilevata la Regione Attiva NOAA 10981, la prima a presentare della macchie ed avere le caratteristiche magnetiche corrette per poter essere assegnata ad un nuovo ciclo di attività solare. Da allora è stato tutto un susseguirsi di voci che si rincorrevano circa la possibilità che il nuovo ciclo avrebbe potuto presentare delle caratteristiche eccezionali, sia in un senso che nell'altro, cioè che avrebbe potuto essere un ciclo di forza notevole, forse mai registrata nel passato, oppure, al contrario, che non sarebbe certo passato alla storia per essere stato uno dei cicli più intensi ma sarebbe stato inghiottito dall'anonimato più assoluto. Arrivati ad oggi il tempo, che com'è noto è galantuomo, ha fatto poi giustizia, per una volta tanto senza dar ragione a qualcuno in particolare, piuttosto dando torto un po' a tutti. Infatti nessuno dei modelli previsionali sviluppati negli ultimi tre anni riesce a dar conto di una situazione nella quale gli osservatori del Sole si trovano ad operare e che ha caratteristiche molto spiccate di un ciclo che tarda ad avviare la sua attività, mantenendosi piuttosto in una fase molto simile a quella di minimo prolungato di quello precedente, pur con le caratteristiche magnetiche di un nuovo ciclo. Un avvio rallentato insomma, che spesso viene etichettato, giustamente, con la locuzione di "minimo prolungato". Ormai la cosa dura da circa 3 anni per cui la faccenda comincia a farsi interessante, ma vediamo di andare con ordine.

2) La situazione attuale

I modelli previsionali per il Ciclo 24, come si è detto, sono sempre stati discordanti. La figura 1 mostra due tendenze contrapposte, come spiegato nella sua didascalia:

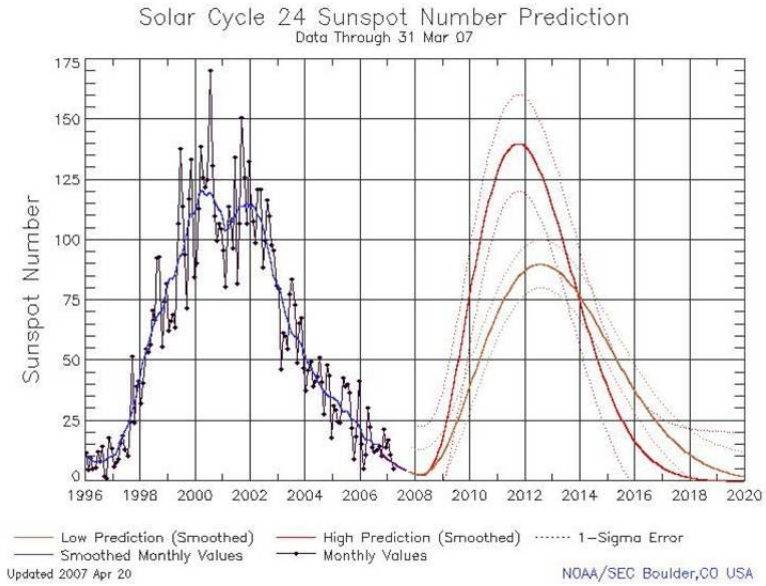


Figura 1 *Andamento dei Numeri di Wolf normalizzati a partire dal 1996. La linea rossa indica il modello che prevedeva un massimo piuttosto intenso poco prima del 2012, quella arancione mostra la previsione per un massimo molto meno intenso intorno alla metà del 2013. Le linee tratteggiate rappresentano i relativi margini di errore. Nessuno dei due modelli indicati si è rivelato esatto finora.*

Il problema è che nessuno dei modelli proposti riesce ad inquadrare la situazione attuale che, nel grafico della figura, potrebbe essere visualizzata con un punto posto in corrispondenza dell'anno 2010 e ad altezza decisamente inferiore a 25, quindi ben al di fuori delle linee di previsione, sia quelle con tendenza per così dire più ottimistica che quelle di tendenza contraria. Anche le immagini confermano l'andamento attuale: in Figura 2 un confronto tra una foto di questi tempi (18 Marzo 2010, a destra) ed una scattata nella stessa data durante la "salita" verso il massimo del precedente ciclo 23 (18 Marzo 1999, a sinistra), in corrispondenza di quella che dovrebbe essere la situazione attuale a parità di distanza temporale dal previsto massimo (due anni) parla da solo:

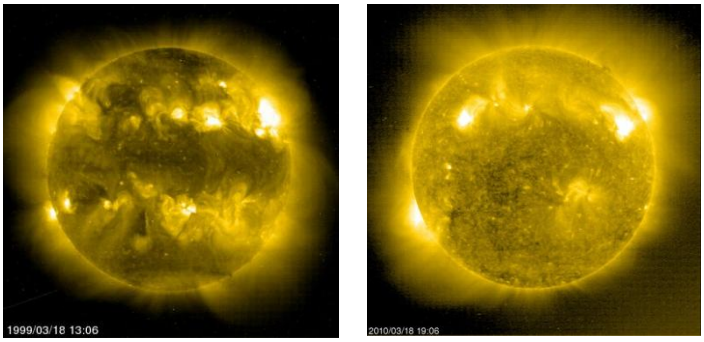


Figura 2 *Immagini del Sole in corona nell'ultravioletto a 28.4 nm circa due anni prima del massimo del ciclo 23 (a sinistra) e, in corrispondenza, nel Marzo di quest'anno. La presenza di più regioni attive e buchi coronali rende evidente che si trattava di un Sole più attivo. Per gentile concessione del Consorzio SOHO/EIT. SOHO è un progetto di cooperazione internazionale tra le Agenzie NASA ed ESA.*

A dire la verità qualche timido segno di risveglio in effetti la nostra Stella sembra mostrarlo; facciamo parlare anche in questo caso i numeri: nel nostro Osservatorio, in tutto il 2009 (287 giorni di osservazione) sono stati conteggiati 29 gruppi per un totale di 528 macchie; per un periodo molto lungo (tra il 10 di Luglio ed il 1 di Settembre) nessuna macchia è apparsa sul Sole; in tutto l'anno sono stati rilevati, nella banda tra 1Å e 8Å (dati NSO-NOAA) solo 26 flares di classe C (2.16 al mese) e nessun flare di classe M o di classe X. Sono state conteggiate (dati NOAA-USAF-SWPC) 30 Regioni Attive (2.5 al mese) ed il flare più intenso è stato di classe C7.6 registrato il 18 Dicembre. Il Numero di Wolf medio (non normalizzato) per tutto l'anno è stato un misero 4.82. Dal 10 Dicembre del 2009 in poi la musica è in effetti cambiata: nei primi 3 mesi di quest'anno (quindi dal 1 Gennaio al 31 Marzo 2010) sempre nel nostro Osservatorio (67 giorni di osservazione) abbiamo avuto 84 giorni con macchie (contando anche quelli nei quali per noi è stato impossibile osservare ma erano presenti) e solo 6 senza macchie; sempre con le stesse fonti di dati sono state conteggiate 21 Regioni Attive in 90 giorni (quindi con una media di 7 al mese), 76 flares di classe C (25.3 al mese), 14 flares di classe M (4.66 al mese) per un totale di 90 flares (in media quindi 1 al giorno e 30 al mese). Il più intenso dei flares è stato un M8.3 il 12 Febbraio; il 16 Febbraio si sono avuti 16 flares di classe C nello stesso giorno (più della metà di quelli conteggiati nell'intero 2009); il 4 ed il 8 Febbraio sono stati rilevati 4 flares di classe M nello stesso giorno. Infine sono stati osservati 23 gruppi per un totale di 768 macchie, con un Numero di Wolf medio (non normalizzato) di 25.56. Anche se siamo ben lontani da quelli che dovrebbero essere i "numeri del Sole" all'approssimarsi di un massimo di attività non resta che prendere atto che qualcosa forse si muove, come testimonia anche l'immagine di questa enorme protuberanza eruttiva (oltre 400.000 Km. di estensione) fotografata il 30 Marzo di quest'anno:

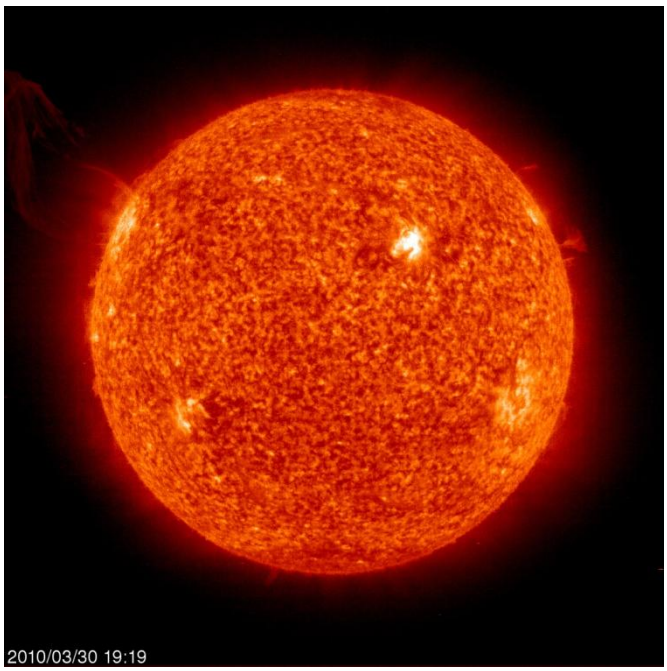


Figura 3 *Spettacolare protuberanza eruttiva, visibile nel quadrante NE del Sole fotografata dal telescopio EIT a 30.4 nm. Le sue dimensioni possono essere facilmente stimate (si veda il testo) tenendo conto che il raggio del Sole è di circa 700.000 Km. e che la cromosfera (a cui si riferisce l'immagine) ha uno spessore di soli 2500 Km. circa. Per gentile concessione del Consorzio SOHO/EIT. SOHO è un progetto di cooperazione internazionale tra le Agenzie NASA ed ESA.*

Attenzione a non farsi però prendere dall'entusiasmo di facili previsioni: così come una rondine non fa primavera, una protuberanza così estesa non vuol dire necessariamente massimo in arrivo e, soprattutto, non dice proprio niente su come potrebbe essere questo massimo, se mai ci sarà. Pertanto ci si può sentire autorizzati ad affermare che comunque restiamo in presenza di un'attività abbastanza scarsa, appunto come si dice da minimo prolungato. Alcuni dati, che emergono dallo studio del Sole compiuto nel corso di decine di anni nel passato e che tuttora proseguono, mostrano però come una situazione come quella attuale potrebbe non essere poi così strana e, soprattutto, potrebbe trovare al loro interno un suo inquadramento quanto meno statistico. E' quello che vedremo a partire dalla prossima sezione.

3) La "forma" di un ciclo

I cicli solari presentano un'asimmetria rispetto alla posizione dei loro massimi (Waldmeier 1935). Il tempo che trascorre da un minimo verso il relativo massimo è normalmente più breve di quello che intercorre nella fase calante del ciclo, verso il successivo minimo. Una sorta di "ciclo medio" può essere ricostruito, come mostrato in Figura 4, utilizzando dati relativi all'ampiezza media del ciclo (espressa in SSN, Sun Spot Number, ossia Numero di Wolf normalizzato) ed alla sua lunghezza media espressa in mesi:

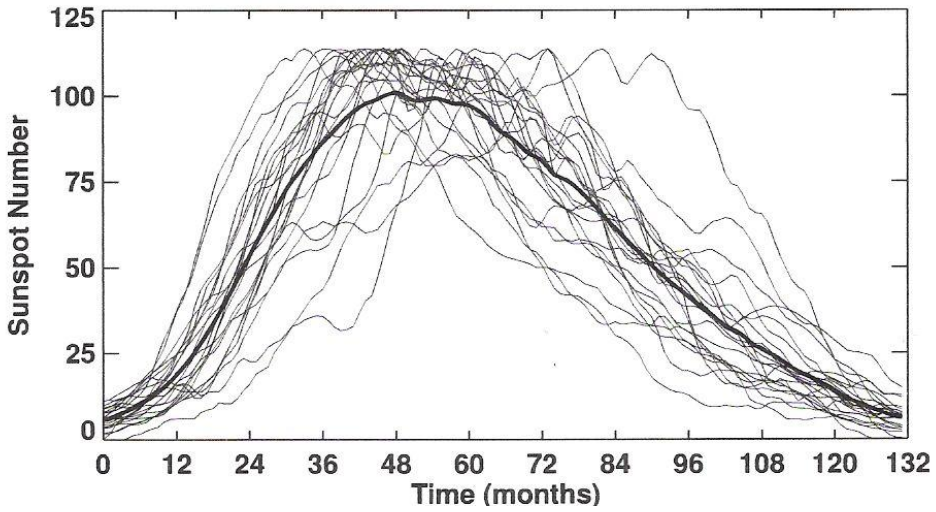


Figura 4 *L'andamento medio dei cicli dall'1 al 22 (linea più spessa) in funzione dell'ampiezza (Sunspot Number, numero di macchie normalizzato) e della durata dei cicli (espressa in mesi). Fonte: The Solar Cycle, di D.H. Hathaway, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1.*

Come si può vedere facilmente, in media un ciclo impiega circa 48 mesi (4 anni) per passare dal minimo iniziale al suo massimo e circa 84 mesi (7 anni) per tornare al minimo successivo: il periodo medio di 11 anni di durata del ciclo (132 mesi) è quindi decisamente rispettato. Sono stati proposti numerosi modelli matematici per interpretare questo andamento. Il più accreditato attualmente è quello proposto da Hataway e collaboratori (1994), che riprende un lavoro precedente di Stewart e Panofsky (1938); secondo tale modello l'andamento dell'intensità di un ciclo in funzione dalla sua durata può essere espresso da una funzione semi-empirica del tempo:

$$F(t) = A\,((t-t_0)/b))^3[\exp((t-t_0)/b))^2 - c]^{-1}$$

nella quale **A** rappresenta l'ampiezza del ciclo, $\mathbf{t_0}$ è il tempo di inizio del ciclo, **b** è il tempo di "salita" verso il massimo (*rising time*) e infine **c** è un parametro che tiene conto dell'asimmetria del ciclo. La miglior corrispondenza con i dati medi ricavabili dalla Figura 4 si ottiene ponendo nell'equazione precedente **A** = 193, **b** = 54, **c** = 0.8 e $\mathbf{t_0}$ = 4 mesi prima del minimo: il risultato è riportato nella successiva figura, dove come prima in ordinata è riportata l'ampiezza del ciclo espressa in SSN ed in ascissa la sua durata in mesi:

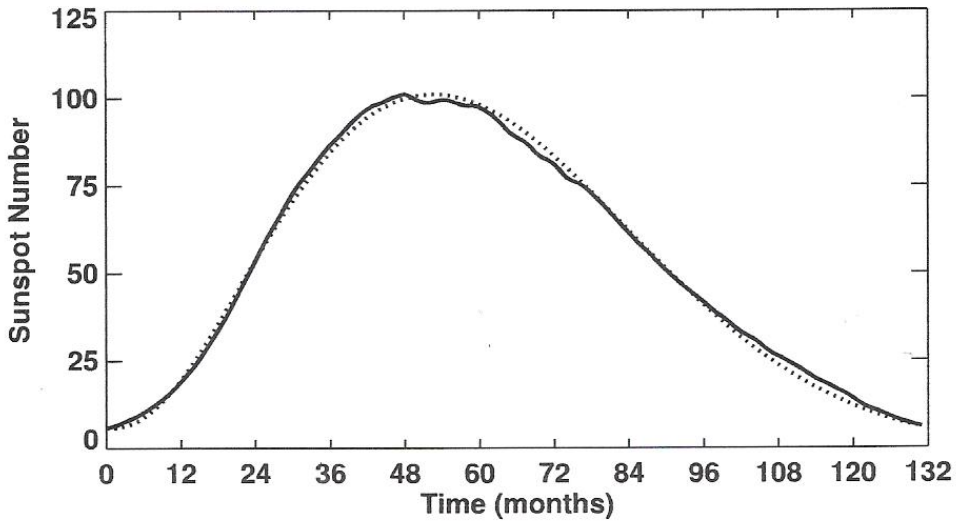


Figura 5 *Il "ciclo medio" (linea continua, ricavata dalla precedente figura 4) e la corrispondenza con la formula proposta da Hathaway e collaboratori (linea punteggiata). La partenza del ciclo è stata posta 4 mesi prima del minimo, il tempo di salita verso il massimo è stato posto a 54 mesi e la durata del ciclo è sovrapposta (overlapping) per 18 mesi a quella del ciclo successivo. Fonte:The Solar Cycle, di D.H. Hathaway, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1.*

E ora vediamo (che è la cosa che più ci interessa) cosa possiamo ricavare dall'analisi di queste considerazioni più o meno complicate: se partiamo dal presupposto peraltro abbastanza ottimistico che il ciclo attuale sia in "ritardo " di circa 24 mesi (Gennaio 2008 – Gennaio 2010) su quello che dovrebbe essere il suo andamento, se rispettasse quello dei suoi predecessori e ammettendo, (cosa non scontata) che ormai si sia "avviato" (ipotesi confortata dall'andamento dei primi 3 mesi di quest'anno), nella precedente figura 5 dobbiamo porre un valore di 78 mesi (54 + 24), che porta per interpolazione immediata ad un SSN di circa 75. Questo potrebbe essere, alla luce del modello indicato, il massimo numero di Wolf normalizzato che potrebbe essere raggiunto nel ciclo 24. Piuttosto piccolo se confrontato con quello dei precedenti, ma perfettamente in linea con l'attuale tendenza " al ribasso " del ciclo in corso. E questo potrebbe essere un primo indizio che quello che sta accadendo non è poi nulla di così strano o imprevedibile. Ma non finisce qui: ci sono anche diverse altre situazioni da analizzare e lo faremo nelle sezioni successive, a partire dalla prossima.

4) L'effetto Waldmeier

Diverse corrispondenze sono state ricavate tra i vari aspetti dell'andamento dei cicli solari. Tra queste, quella forse più significativa è il cosiddetto Effetto Waldmeier (Waldmeier, 1935, 1939), secondo il quale il tempo di salita di un ciclo dal minimo verso il massimo è praticamente inversamente proporzionale alla sua ampiezza. Questo è mostrato in figura 6, utilizzando i dati relativi ai SSN ed alle onde radio emesse dalla stella a 10.7 cm.

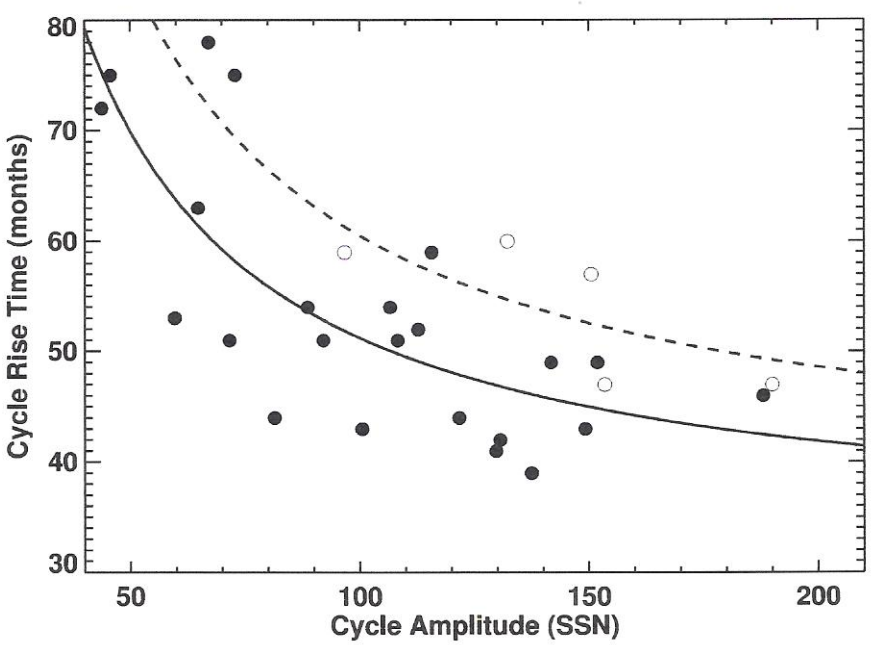


Figura 6 *Effetto Waldmeier. Il tempo di salita di un ciclo (rising time) dal minimo al massimo è riportato in funzione dell'ampiezza del ciclo, espressa in SSN per i cicli dall'1 al 23 (linea continua e cerchi pieni) ed in funzione del radioflusso a 10.7 cm. per i cicli dal 19 al 23 (linea tratteggiata e cerchi vuoti). E' evidente in entrambi i casi una relazione di proporzionalità inversa. Normalmente i massimi di attività nel radioflusso a 10.7 cm. seguono in modo sistematico di alcuni mesi (circa 6) quelli delle macchie solari, ma i due set di dati sono strettamente interconnessi. Fonte:The Solar Cycle, di D.H. Hathaway, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1.*

Bachmann e White (1994) hanno proposto una formula semiempirica che rende conto piuttosto bene dell'andamento espresso nella figura precedente:

T (rising time in mesi) ~ 35 + 1800 / Ampiezza del ciclo (espressa in SSN)

perlomeno per quanto riguarda i dati relativi ai Nuneri di Wolf normalizzati.

Anche da queste considerazioni emergono interessanti conclusioni: sempre ponendo (come nella sezione precedente) 78 mesi come tempo di salita del ciclo verso il massimo, dalla figura 6 si ottiene facilmente che considerando i dati relativi ai SSN si ricava un Numero di Wolf normalizzato massimo di poco superiore a 52, mentre interpolando i dati relativi al radioflusso a 10.7 cm. si otterrebbe un Numero di Wolf normalizzato massimo intorno a 68. Mediando questi due dati con il precedente di 75 ottenuto nella sezione precedente arriviamo ad un valore di circa 65. E ancora eccoci in presenza di un Numero di Wolf normalizzato massimo piuttosto bassino, perfettamente in linea con la tendenza attuale del ciclo 24.

5) Durata di un ciclo e ampiezza

Altre relazioni molto significative sono state ricavate tra il periodo di un ciclo (la sua durata in mesi, intesa da un minimo all'altro) e la sua ampiezza (come sempre misurata in SSN). La più accreditata è quella proposta indipendentemente da Hathaway e collaboratori (1994) e da Solanski e collaboratori (2002), che mette in relazione la durata di un ciclo con l'ampiezza probabile di quello successivo. La successiva figura mostra le conclusioni di questi ricercatori:

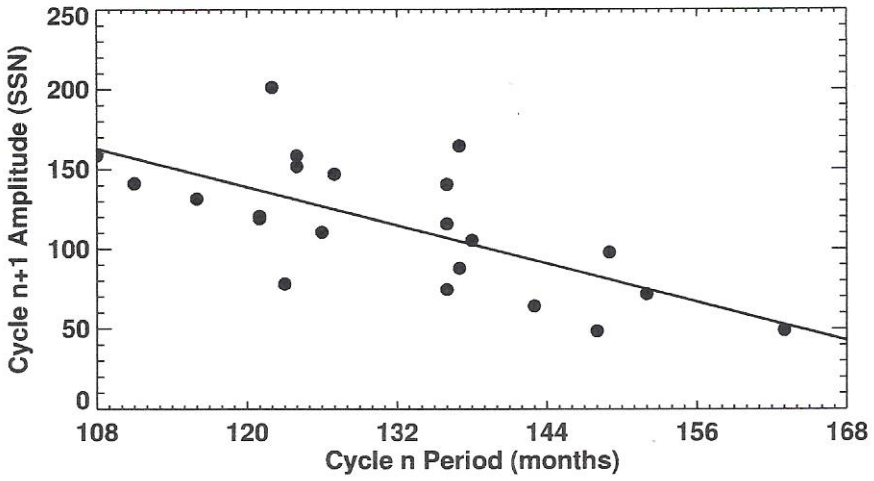


Figura 7 *La durata (periodo) di un ciclo generico n (espressa in mesi) è messa in relazione con l'ampiezza (in SSN) del generico ciclo successivo n+1. Si nota che maggiore è la durata di un ciclo, tendenzialmente il ciclo successivo tende ad essere più debole del precedente. Fonte:The Solar Cycle, di D.H. Hathaway, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1.*

Ancora una volta ipotizziamo che il ciclo 23 precedente (n) stia continuando il suo minimo per almeno 24 mesi (il che equivale ad affermare che la partenza di quello attuale sia in ritardo dello stesso intervallo temporale). Prendiamo perciò un valore di 156 mesi (132 + 24) sull'asse orizzontale della figura precedente. Questo porta per interpolazione ad un sorprendente valore di circa 65 per l'ampiezza del ciclo successivo (n+1), cioè dell'attuale 24, in quasi perfetto accordo con i dati ricavati nelle precedenti sezioni. Gli indizi si accumulano, ma non sono finiti.

6) Il ciclo di Gleissberg

Quello ipotetico degli 11 anni per il transito da un minimo all'altro non è l'unico evidenziato nell'attività del Sole. Ne sono stati proposti molti altri, alcuni su scala di secoli, altri addirittura di millenni ed altri ancora, al contrario, dell'ordine di pochi mesi. Tra tutti ce n'è uno, detto Ciclo di Gleissberg, che sembra evidenziare la presenza di un massimo più intenso degli altri ogni 7 - 8 cicli circa di 11 anni, cioè ogni 77 - 88 anni circa. Questo super-ciclo è evidenziato nella figura seguente:

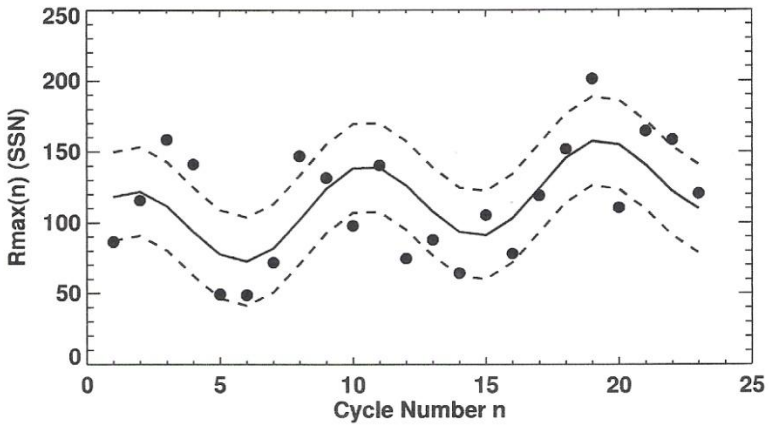


Figura 8 *Il Ciclo di Gleissberg per i primi 23 cicli. La linea continua rappresenta la miglior corrispondenza tra due ipotetici cicli sinusoidali con periodi leggermente diversi. In ascissa gli SSN massimi. Fonte:The Solar Cycle, di D.H. Hathaway, Living Rev. Solar Phys., 7, (2010), 1.*

E’ evidente dalla figura che la tendenza attuale di questo super-ciclo è in discesa. Il ciclo 24 si troverebbe quindi in una fase di minimo di quello di Gleissberg e questo potrebbe rendere conto della sua “debolezza”. E’ da far notare anche qui il valore di circa 70 (sempre per interpolazione) per il Numero di Wolf normalizzato massimo prevedibile per il ciclo in corso.

7) Un altro dato significativo

Circa un anno fa S. Cortesi, Direttore della Specola Solare Ticinese di Locarno Monti, sulla rivista “Meridiana” (S.Cortesi, “Un minimo solare prolungato”, Meridiana N° 199, Gennaio – Febbraio 2009, pag. 18-19) aveva espresso la sua opinione circa un valore massimo del Numero di Wolf normalizzato intorno a 70 prevedibile per il 2013 circa, basandosi su un’accurata analisi dei Numeri di Wolf dal 1700 ad oggi ed in particolare sull’anomalia presentata (nel ciclo 24) dall’assenza di macchie solari del nuovo ciclo a latitudini eliografiche superiori a ± 20° sovrapposte alle macchie del vecchio ciclo più vicine all’equatore. Comparando tali dati con quelli di diversi cicli precedenti S. Cortesi è giunto alla sua conclusione. Si tratta senza dubbio alcuno di un parere molto autorevole, proposto da un ricercatore che da oltre 50 anni si occupa di osservazione sistematica della fotosfera, che si accorda quasi alla perfezione con quanto esposto finora nel presente lavoro.

8) Conclusioni

Non sono poche le corrispondenze tra le più recenti teorie relative all’andamento dei cicli solari ed il comportamento considerato anomalo (perlomeno relativamente a quelli precedenti) di quello in corso, al punto tale che ci si potrebbe sentire autorizzati ad aver individuato una possibile chiave di lettura per spiegare quanto sta avvenendo di questi tempi sul Sole. Non si deve però dimenticare che si tratta di risultati legati ad una ricerca in continua evoluzione e come tali passibili di conferme o smentite possibili anche in tempi molto brevi. Come fa notare S.Cortesi nel suo citato articolo su Meridiana, fare previsioni oggi sulla possibile evoluzione del ciclo 24 è quantomeno prematuro e sarà meglio riparlarne tra qualche anno. Ci sono forse degli indizi, presentati in questo lavoro, ma in quanto tali non sono prove. Nel frattempo c’è chi approfitta di questa fase di minimo prolungato per studiare le proprietà del campo magnetico in condizioni di “Sole quieto”, cioè alla larga dalle Regioni Attive. Vista la reticenza con la quale si mostrano di questi tempi, saranno certo contenti questi ricercatori (che operano soprattutto nel campo della spettropolarimetria solare). A tutti gli altri la consolazione di poter forse raccontare un giorno ai propri discendenti di aver vissuto e seguito da vicino un momento forse “storico” della vita della nostra stella: uno di quei minimi prolungati che in passato si sono già presentati e sono durati anche parecchio (ad esempio il famoso minimo di Maunder, tra il 1645 ed il 1710). Forse non sarà questo il caso, ma forse sì, nessuno può dirlo finora.

FLARES SOLARI: MODELLI INTERPRETATIVI E PREVISIONALI

di **Mario Gatti**

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

15 Novembre 2009

Abstract

I Flares solari, fenomeni nei quali si sviluppano energie di dimensioni spaventose, sono interpretabili attraverso la cosiddetta teoria della riconnessione magnetica tra regioni attive contigue presenti nella corona e nella cromosfera del Sole. Per i flares esiste una apposita classificazione, diversificata tra l'osservazione dei fenomeni in luce visibile o nella banda dei raggi X duri tra 0.5Å e 8Å. La loro esistenza, non certo scollegata da tutte le altre manifestazioni di attività della stella, come le macchie, le protuberanze, i buchi coronali e gli EMC (emissioni massive coronali), è dovuta essenzialmente alle proprietà del campo magnetico del Sole e può influenzare il nostro pianeta soprattutto per il possibile incremento dell'intensità del vento solare. Questo, che può condurre in casi estremi (ma non così improbabili, specialmente durante una fase di massimo dall'attività solare) alle cosiddette "tempeste solari" potrebbe arrecare, in tempi molto brevi dopo l'evento (dell'ordine di pochi giorni), seri danni ai sistemi di comunicazione e di trasmissione dati e, in tempi più lunghi, influenzare anche significativamente l'andamento climatico terrestre. La possibilità di prevedere in anticipo questi fenomeni diventa quindi di capitale importanza per l'umanità, che si basa sempre più su quella tecnologia che potrebbe essere molto vulnerabile in caso di "attacchi dal Sole". Dopo una dettagliata illustrazione dei Flares ed un possibile modello per la loro interpretazione viene presentato un metodo statistico di previsione per i Flares di intensità maggiore (quindi quelli potenzialmente più "pericolosi") basato sulle osservazioni compiute tra il 1988 ed il 1996, durante il ciclo solare n° 22 e sull'ipotesi che gli accadimenti di questi eventi possano essere descritti correttamente da una distribuzione di Poisson, descritta nel testo. Questo lavoro è rivolto a Studenti di scuola secondaria superiore che compiono studi scientifici e che sono in possesso di conoscenze pregresse sufficienti sull'attività del Sole e sui metodi di indagine della stessa.

1) Flares

I Flares solari sono fenomeni transitori che avvengono nelle parti esterne dell'atmosfera del Sole e possono avere una durata variabile da alcuni minuti a diverse ore. L'energia emessa da un flare può raggiungere anche i 10^{25}J ed è quindi paragonabile a quella dell'esplosione di migliaia di ordigni nucleari terrestri. Il primo ad osservare questi spettacolari fenomeni esplosivi fu l'astronomo R.C. Carrington nel 1859, che notò un improvviso aumento di luminosità sulla fotosfera in corrispondenza di un gruppo di macchie solari. Anche se la loro scoperta avvenne quindi, storicamente, in luce visibile, la radiazione emessa durante un Flare interessa praticamente tutte le regioni dello spettro, anche se in modo differenziato a seconda delle frequenza, come vedremo in seguito. In conseguenza di questo l'indagine degli astronomi che vanno alla caccia di Flares si estende su tutta la gamma delle lunghezze d'onda, anche se la tecnica più impiegata da osservatori al suolo è quella della ricognizione del Sole nella riga spettrale Hα dell'Idrogeno a 6563Å, condotta con opportuni filtri a banda passante sufficientemente ridotta (da 0.25Å a 0.5Å). Dalle stazioni spaziali, come ad esempio TRACE (Transitional Region and Coronal Explorer), è possibile però ottenere immagini decisamente più dettagliate e affascinanti, specialmente nella banda X dello spettro, dove i Flares si manifestano solitamente nel modo più evidente e spettacolare.

Anche le immagini SOHO/EIT, soprattutto quelle a 195Å, forniscono ottimi dettagli visivi dei Flares, come illustrato nella Figura 1 più avanti in questa pagina.
Nel seguito verranno illustrate le diverse caratteristiche di questi fenomeni a seconda della lunghezza d'onda in cui si osservano. Per ora ci basti dire che, per essere considerato tale, un Flare deve superare due soglie caratteristiche: di estensione e di luminosità. Rimanendo nel campo dell'osservazione in Hα, un Flare deve interessare una superficie superiore ai 10^3 mesv (1 mesv, milionesimo di emisfero solare visibile, è un'unità di superficie comunemente usata in fisica solare, ed equivale a $3.047X10^6$ Km^2) ed avere una luminosità superiore al 150% del fondo di luminosità medio della cromosfera in condizioni di "sole quieto", cioè lontano dalla presenza di eventuali regioni attive. Al di sotto anche di una sola di queste due soglie non è comunemente corretto associare un semplice aumento di luminosità in cromosfera ad un vero e proprio Flare.

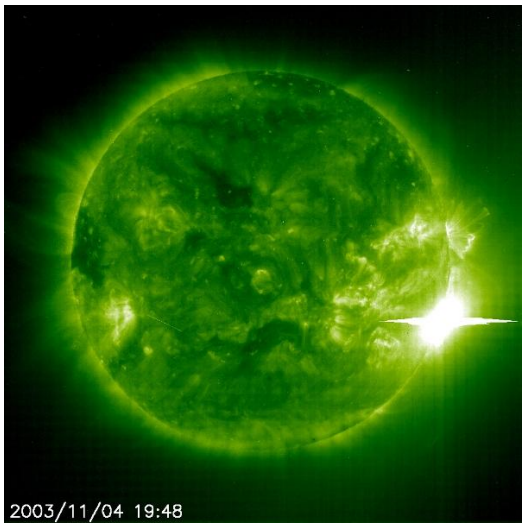


Fig. 1 *Notevole Flare fotografato dal telescopio EIT (Extreme Ultraviolet Imager Telescope) nell'estremo ultravioletto a 195Å durante la fase discendente del ciclo solare 23, circa due anni dopo il massimo. Notare la grande brillanza del Flare rispetto anche ad altre regioni attive.*
Per gentile concessione del Consorzio SOHO/EIT/MDI. SOHO è un progetto di cooperazione internazionale tra le Agenzie NASA ed ESA

In lingua italiana il termine Flare è spesso tradotto con "*brillamento*", anche se con questo termine, più correttamente, si intende solo una delle manifestazioni di un Flare, cioè l'aumento di luminosità nella regione visibile dello spettro. Dal punto di vista morfologico, spesso i Flares si presentano con una sorta di linea opaca che li divide in due zone più o meno somiglianti: si parla in questi casi di "Flares a due nastri" (*two-ribbons Flares*); altre volte assumono la forma di una Y (diritta o rovesciata), presentano anche più punti particolarmente brillanti e possono essere associati ad archi coronali (*loops*), grandi protuberanze ed emissioni massive coronali (EMC). Sono ovviamente generati in corrispondenza di regioni attive e la loro origine può essere spiegata interpretando correttamente certe proprietà del campo magnetico del Sole, come si vedrà in seguito. Infine, fra le altre caratteristiche, vale la pena di ricordare la presenza dei cosiddetti Flares *omologhi* e di quelli detti *simpatetici*. I primi hanno caratteristiche simili tra loro e si ripetono nella stessa regione attiva ad intervalli temporali che vanno da qualche ora ad un giorno (a volte si presentano successioni di 5 o più Flares, quasi tutti uguali come se si trattasse dello stesso evento che si presenta a più riprese); i Flares simpatetici sono invece coppie di Flares che si presentano in regioni attive diverse, non casualmente ma per una effettiva connessione fisica tra loro, come se un evento potesse scatenarne un altro simile in una zona della stella anche parecchio distante dalla prima una buona frazione di

"raggio solare".La Figura 2 che segue in questa pagina mostra chiaramente come un Flare si manifesti in maniera molto più appariscente mano a mano che si procede verso la parte ultravioletta estrema (e meglio ancora verso i Raggi X) dello spettro:

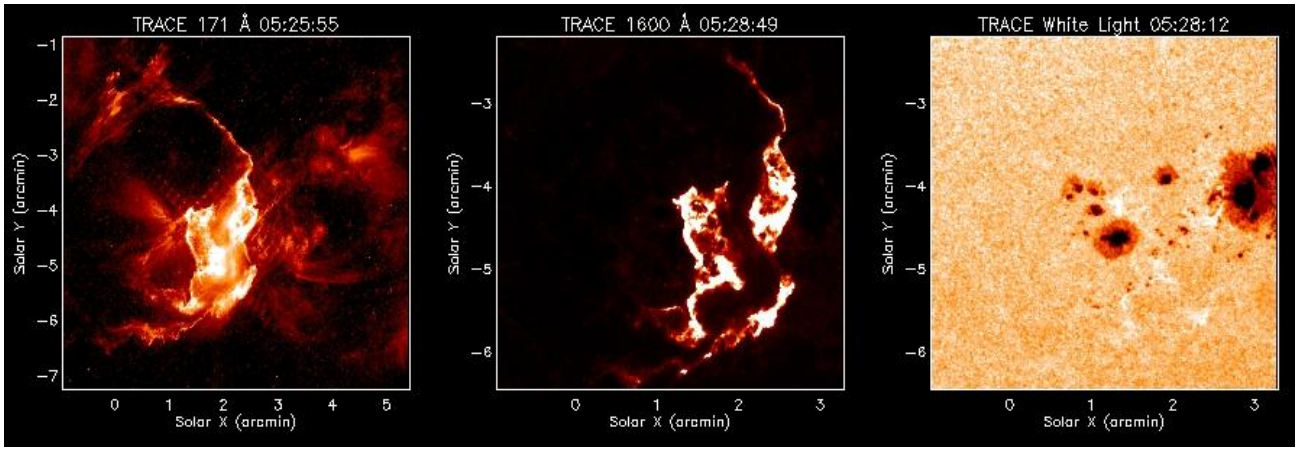


Fig. 2 *Un bellissimo Flare a due nastri ripreso dalla sonda TRACE nell'ultravioletto estremo a 171Å (immagine a sinistra), nell'ultravioletto a 1600Å (immagine al centro) e nel continuo (immagine a destra). Notare come i dettagli visivi del Flare si perdano procedendo verso la porzione visibile dello spettro; evidente anche il gruppo di macchie solari in fotosfera in sua corrispondenza . L'evento è stato registrato il 10 Aprile del 2001, ha avuto inizio alle 04:48 TU ed ha avuto il picco di emissione nella banda X tra 1Å e 8Å alle 05:26 TU.*

Fonte: TRACE Flares Catalog

2) Un modello per l'origine dei Flares

Un Flare è un evento nel quale avviene la dissipazione di una quantità enorme di energia in tempi anche molto brevi. Il fatto che si presentino quasi sempre in corrispondenza di regioni attive, dove l'intensità locale del campo magnetico del Sole è molto elevata (dell'ordine di 10^2 G, al quale può essere associata un'energia magnetica dell'ordine di $4X10^{25}$J, quindi tipica di un Flare) porta naturalmente a cercare nelle proprietà del campo coronale una possibile spiegazione per l'esistenza di eventi tanto drammatici dal punto di vista energetico. Molti modelli sono stati proposti in tal senso ed il più conosciuto di questi, dovuto a J.Heyvaerts e E.Priest, si basa sul fenomeno detto della *riconnessione magnetica*. Secondo questo modello, la comparsa di una nuova regione attiva in prossimità di un'altra già esistente mette per così dire "a contatto" campi magnetici di polarità opposta. Nella Figura 3 alla pagina seguente, che illustra il modello in questione, la regione tratteggiata rappresenta il fenomeno di riconnessione magnetica, nel quale si verificano produzione di energia e fasci di particelle accelerate: queste ultime, che si muovono seguendo le linee del campo "rientrano" verso la cromosfera dando luogo ad un aumento di luminosità che si manifesta come un Flare a due nastri nella riga Hα. Ai Flares sono strettamente associati anche i cosiddetti *radio bursts*, emissioni di tipo non termico nelle onde radio da parte del Sole, di durata compresa tra qualche secondo ed alcuni giorni.

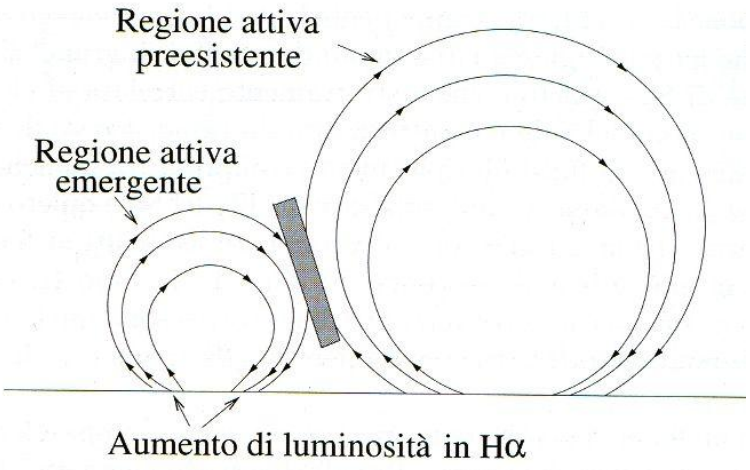


Fig. 3 *Modello basato sul fenomeno della riconnessione magnetica che interpreta l'aumento di luminosità in Hα associato ad un Flare. La spiegazione è nel testo alla pagina precedente.*

Fonte: "Fisica Solare", di E. Landi Degl'Innocenti, Springer-Verlag Italia, Milano 2008, pag. 210

3) Curve di luce

Anche se il termine "Curva di Luce" è comunemente impiegato nel campo dello studio delle stelle variabili, qui viene inteso come illustrazione dell'intensità della radiazione emessa in diverse regioni dello spettro durante un Flare. Si veda in proposito la seguente figura 4:

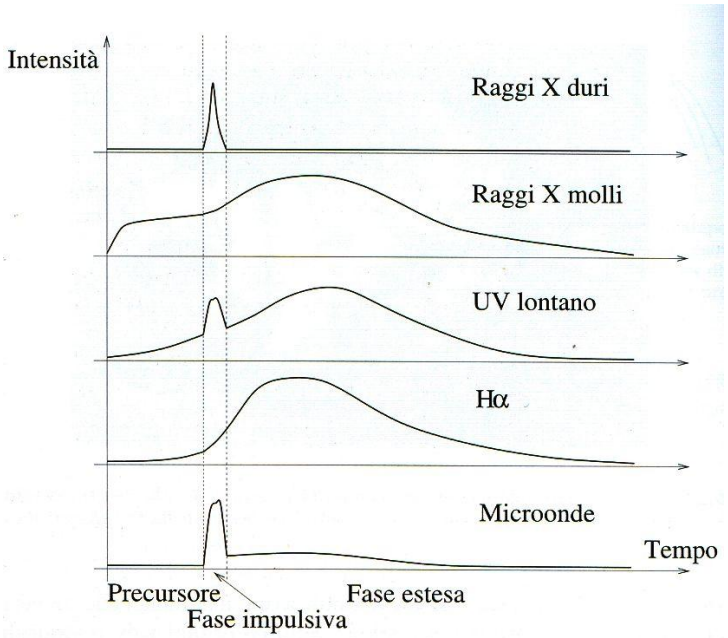


Fig.4 *Andamento con il tempo dell'intensità della radiazione emessa in un Flare. Le intensità sono in scala arbitraria.* Fonte: "Fisica Solare", di E. Landi Degl'Innocenti, Springer-Verlag Italia, Milano 2008, pag. 208

Un Flare inizia con una fase, detta *precursore*, durante la quale l'emissione da parte del plasma coronale avviene solo nella parte dei Raggi X molli e dell'ultravioletto lontano: nelle altre porzioni dello spettro l'emissione non risalta sul background del Sole quieto. In tutto lo spettro segue invece

la *fase impulsiva*, della durata tipica di qualche minuto, che presenta una forma "a picco" nei Raggi X duri, nell'UV estremo e nelle microonde ed un aspetto più "morbido" (*flat*) nei Raggi X molli e nel visibile in Hα. Segue infine la cosiddetta *fase estesa*, assente nei Raggi X duri, quasi assente o di breve durata nelle microonde, più lentamente degradante nelle altre regioni. La durata media del precursore (laddove si presenta) è dell'ordine di 5-10 minuti, quella della fase impulsiva di 1-3 minuti mentre la fase estesa (dove presente) è dell'ordine di un'ora. Come si vede dalla figura 4, è nei Raggi X duri che un Flare si presenta nel modo più violento e rapido, mentre in Hα e nei Raggi X molli presenta un andamento, per modo di dire, più regolare nel tempo, se qualcosa di "regolare" può essere visto in fenomeni di tale portata energetica. Un aspetto importante è la distribuzione in energia dei Flares osservati: indicando con N(E)ΔE il numero di Flares con energia compresa tra E ed E+ ΔE, si dimostra che la funzione N(E) segue una legge esponenziale piuttosto semplice:

$$N(E) = KE^{-\alpha}$$

dove K è una costante e α vale circa 1.6. Quindi si passa di fatto attraverso una distribuzione continua di energie, dai fenomeni più energetici a quelli via via più deboli, detti anche *sub-flares*, *micro-flares* e *nano-flares*. Secondo un modello (detto di Parker) sarebbero proprio questi ultimi, che non sono praticamente osservabili, ad accadere in gran numero e contribuire così al riscaldamento coronale, uno dei problemi ancora aperti e dibattuti della fisica del Sole.

4) Classificazione dei Flares

Esistono modi diversi per classificare i Flares. In uno di questi (il primo dal punto di vista storico) si utilizza quantitativamente l'area della porzione di superficie solare interessata da un Flare osservato in Hα, quindi si costruisce una sorta di "scala di importanza", come illustrato in Tabella 1:

Importanza	Superficie (gradi^2)
0	$S < 2.0$
1	$2.1 \leq S \leq 5.1$
2	$5.2 \leq S \leq 12.4$
3	$12.5 \leq S \leq 24.7$
4	$S \geq 24.8$

Tab.1 *Classificazione dei Flares per osservazioni ottiche al suolo in Hα*

La superficie S è misurata in gradi quadrati (1 grado equivale a circa 12000 Km.) e l'importanza spesso è seguita da una lettera: F per debole (*faint*), N per normale (*normal*) e B per brillante (*brilliant*): pertanto secondo questo schema i Flares possono essere classificati come 1F, 3B, 2N eccetera. Una classificazione più recente (e molto più comunemente utilizzata in fisica solare) si basa sul flusso massimo misurato fuori dall'atmosfera terrestre durante la fase impulsiva di un Flare, in una "finestra" nella regione dei Raggi X duri, compresa tra 1Å e 8Å.

In relazione al flusso misurato vengono attribuite al Flare delle lettere (A,B,C,M,X), dette classi, eventualmente seguite da un numero, come riportato nella sottostante tabella 2:

Classe	Potenza nei Raggi X (Wm^{-2})
A	$P < 10^{-7}$
B	$10^{-7} \leq P \leq 10^{-6}$
C	$10^{-6} \leq P \leq 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq P \leq 10^{-4}$
X	$P > 10^{-4}$

Tab.2 *Classificazione dei Flares per osservazioni nei Raggi X al di fuori dell'atmosfera terrestre*

Il limite inferiore di ogni classe viene fatto generalmente seguire da un numero compreso tra 0 e 9. Per esempio un Flare di classe C2 corrisponde ad una potenza emessa di $2X10^{-6}$ Wm^{-2}, uno di classe M3 ad una potenza di $3X10^{-5}$ Wm^{-2}. Il Flare più intenso mai misurato è stato classificato come X28, quindi con una potenza di $28X10^{-4}$ Wm^{-2}. Per un certo Flare, i due sistemi di classificazione proposti ed illustrati non sempre corrispondono necessariamente.

5) Importanza della previsione dei Flares

Da quanto detto fin qui, dovrebbe apparire chiaro come la presenza e l'intensità dei Flares sia strettamente connessa con le regioni attive e tutti gli altri fenomeni legati all'attività solare quindi, in ultima analisi, con l'andamento dei cicli solari. E' noto che durante il periodo del massimo di attività di un certo ciclo possono presentarsi situazioni in cui l'attività della stella raggiunge livelli notevoli che, per l'aumento dell'intensità del vento solare, possono dare luogo sulla Terra a quelle che vengono chiamate "tempeste solari". Se da un lato queste possono dare vita a fenomeni splendidi e spettacolari come le aurore polari, dall'altro rappresentano certamente una potenziale sorgente di rischio per tutto quello che sul nostro pianeta si basa sulle onde radio (trasmissioni satellitari per esempio) o comunque sull'energia elettrica in genere. Forti tempeste solari sono certamente avvenute in passato e, anche se ora stiamo vivendo una situazione particolare di minimo prolungato dell'attività solare, di fatto in ritardo di più di tre anni rispetto all'andamento del ciclo attuale, altre dobbiamo aspettarcele prima o poi nel futuro. Ma rispetto al passato qualcosa è cambiato: l'umanità (o perlomeno una frazione consistente di essa) dipende ora in maniera sempre maggiore proprio da quella tecnologia che può essere messa a rischio in caso di arrivo di forti perturbazioni elettromagnetiche dal Sole. E' rimasta famosa la cosiddetta "*tempesta di Halloween*", che negli ultimi giorni di Ottobre del 2003 provocò un impressionante black-out elettrico e nelle comunicazioni in buona parte del continente Nord Americano, segnatamente nel Canada Nord Orientale e sulla costa atlantica degli Stati Uniti. Scenari del genere potrebbero ripetersi in modo anche più violento (il ciclo scorso, il 23, durante il quale si produsse la tempesta di Halloween, non è stato certo tra i più intensi che si conoscano). Senza voler fare (come qualcuno fa approfittando del sensazionalismo che sempre si ottiene quando si tirano in ballo eventi catastrofici) predizioni di

scenari apocalittici per i prossimi anni (e segnatamente per l'ormai famigerato 2012) è però fuori discussione che una forte tempesta solare potrebbe presentare davvero un serio problema per molti di noi e addirittura per l'economia mondiale (basti pensare ad un ipotetico blocco delle comunicazioni satellitari nel mondo industrializzato, dove tutto o quasi ormai è connesso a livello globale e necessita spesso di informazioni in tempo reale). Poter prevedere in qualche modo accadimenti del genere potrebbe quindi (come nel caso delle previsioni degli eventi atmosferici o tellurici particolarmente violenti) essere utile, quanto meno per prepararsi in qualche modo ad affrontarli. Il Sole è quindi un sorvegliato speciale: viene continuamente spiato da tanti occhi, dalla Terra e dallo spazio, anche per cercare di capire in anticipo quando e con quale intensità potrebbe decidere di scagliare verso di noi quelle che per lui sono piccole gocce di un mare di energia emessa, ma che per noi potrebbero essere delle vere e proprie alluvioni. Un modello che aiuti a prevedere, tra le altre cose, la probabilità che si presentino Flares ed in particolar modo quelli più energetici sarebbe quindi di grande aiuto in questo senso, visto che questi eventi sono strettamente collegati a tutta l'attività della stella nel suo insieme. Di questi modelli ne esistono diversi, qui ne studieremo uno in particolare, ma prima è necessario aprire una piccola parentesi matematica.

6) La distribuzione di Poisson

Facendo riferimento ad un certo intervallo particolare di tempo sempre uguale (ad esempio un'ora, un giorno o un anno), in questo possono accadere eventi in modo casuale il cui numero può variare da zero ad un certo numero n, che non si può determinare a priori. Per esempio il numero di temporali che possono scatenarsi dall'inizio di Giugno alla fine di Ottobre tutti gli anni in un certo luogo della Terra. La distribuzione statistica di eventi del genere è stata studiata dal matematico francese Simeon Denis Poisson, che elaborò una formula che porta ancora oggi il suo nome. Prima di entrare nei dettagli di questa famosa formula vediamo quali caratteristiche deve avere un certo evento per poter essere correttamente interpretato secondo la cosiddetta distribuzione (o statistica) di Poisson:

1) Il numero di eventi che possono verificarsi in un certo intervallo di tempo o di spazio prefissati è una variabile casuale indipendente, cioè non è influenzata dagli eventi precedenti e non influenza quelli successivi.

2) Ogni evento avviene raramente, per cui in intervalli di tempo debitamente piccoli, il numero di eventi non supera l'unità.

3) La probabilità che si verifichino simultaneamente un certo numero di eventi è costante nel tempo cioè, per distinti intervalli di tempo, la probabilità di n eventi simultanei è costante.

Una volta fissate queste condizioni, dal punto di vista matematico una variabile casuale si distribuisce in modo poissoniano (ossia segue la statistica di Poisson) se la probabilità che si verifichino un numero m di eventi è data da:

$$P_m = (a^m / m!)\, e^{-a}$$

dove e è la base dei logaritmi naturali e la grandezza a, detta parametro della legge di Poisson, rappresenta la frequenza media di accadimento dell'evento osservato. Quindi la probabilità di ottenere con successo due eventi è data da $e^{-a}a^2/2!$, quella di ottenerne tre è $e^{-a}a^3/3!$ eccetera.

Un esempio: supponiamo che al centralino dei Vigili del Fuoco di una città arrivino in media 3,5 richieste ogni ora di interventi urgenti per incendi o allagamenti di cantine. Ci interessa calcolare la probabilità
+che in una stessa ora arrivino 3, 4, oppure 5 chiamate urgenti. Il fenomeno può essere descritto utilizzando la formula di Poisson, con a = 3,5.
Applicando la formula di Poisson otteniamo:

$P_3 = (3{,}5^3 / 3!) \times e^{-3,5} = 0.21579$ cioè il 21.6% circa di probabilità che arrivino 3 chiamate all'ora.
$P_4 = (3{,}5^4 / 4!) \times e^{-3,5} = 0.1888$ cioè il 18.9% circa di probabilità che arrivino 4 chiamate all'ora.
$P_5 = (3{,}5^5 / 5!) \times e^{-3,5} = 0.13217$ cioè il 13.2% circa di probabilità che arrivino 5 chiamate all'ora.

7) Il modello previsionale del NOAA Space Enviroment Center

Esiste un modello piuttosto semplice di previsione per i Flares di una certa classe (limitatamente alle classi C, M e X in quanto quelle A e B sono relative a Flares di bassa potenza emessa nei Raggi X), elaborato dallo Space Enviroment Center (Centro per l'ambiente spaziale) del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), l'ente che in collaborazione con l'aviazione militare degli Stati Uniti (USAF) produce giornalmente il bollettino delle regioni attive eventualmente presenti sul Sole. Il metodo si basa sulle osservazioni compiute durante il ciclo solare 22, dal Novembre del 1988 al Giugno del 1996 ed utilizza la percentuale di probabilità basata sul numero di Flares prodotti in quel periodo nelle regioni attive descritte usando la classificazione cosiddetta di McIntosh (McIntosh, P., 1990, Solar Physics, 125, 251). La classificazione McIntosh è basata su tre lettere (la prima maiuscola e le altre due minuscole): la prima corrisponde a quella della classificazione detta di Zurigo (o di Waldmeier), escluse la G e la J, la seconda e la terza descrivono la presenza o meno ed il tipo di penombra che eventualmente circonda le macchie di un gruppo associato alla regione attiva. Ad esempio, una regione attiva (o un gruppo di macchie) classificato come Eai secondo McIntosh corrisponde ad un gruppo di tipo E secondo la classificazione di Zurigo, cioè un gruppo con macchie in penombra ad entrambe le estremità che si estende tra i 10 ed i 15 gradi di longitudine eliografica; la penombra, piccola ed asimmetrica, sulle macchie maggiori è irregolare ed al suo interno si presentano diverse macchie separate tra loro: l'estensione lungo l'asse Nord-Sud attraverso la penombra è minore o uguale a 2.5 gradi eliografici; sono presenti numerose macchie tra la macchia principale precedente e quella principale seguente, ma nessuna di loro presenta una penombra osservabile. Come si vede si tratta di un sistema di classificazione complesso, ma molto dettagliato ed esauriente.
Ed ora veniamo al metodo previsionale che ci interessa: l'ipotesi principale su cui questo si basa è che il numero di Flares di una certa classe, associati ad una regione attiva di un certo tipo secondo McIntosh e che accadono in un certo tempo prefissato (in questo caso dal 11/1988 al 06/1996) segua una distribuzione di Poisson come illustrato nel paragrafo precedente. Sapendo quindi, ad esempio, che tra il Novembre del 1988 ed il Giugno del 1996 sono state conteggiate 302 regioni attive classificate come Eai, e di queste 62 hanno prodotto Flares di classe M, il numero medio di Flares di classe M per giorno, nel periodo di tempo considerato è dato da 63/302, ossia circa 0.21. Applicando la formula della distribuzione di Poisson, il metodo stima quindi la probabilità che nelle 24 ore successive ad un certo giorno avvengano uno o più eventi di Flares di classe M nel seguente modo:

$$P_{m\geq 1} = 1\text{-}e^{(\text{-valore medio per giorno})}$$

Nel nostro caso avremo $P_{m\geq1} = 1\text{-}e^{(-0.21)} \approx 0.19$, ossia il 19% di probabilità circa che una regione attiva di classificazione Eai produca uno o più Flares di classe M nelle 24 ore successive. Ovviamente il metodo viene applicato per tutti i tipi di regioni attive presenti in un certo giorno sul Sole e per tutte le classi C,M e X di Flares. Ecco quindi che si ottiene, per le 24 ore successive, una percentuale stimata di possibili "arrivi" di Flares per ciascuna delle regioni attive osservabili. Si tratta di un metodo statistico basato sulle osservazioni di un solo ciclo solare, quindi non si può pretendere una totale affidabilità, ma spesso si presenta sorprendentemente efficace nelle previsioni, in special modo per i pur rarissimi Flares di tipo C che in questi giorni, qualche volta e poco spesso, si degnano di farsi osservare. Se il metodo funziona abbastanza bene in questi tempi di bassa attività è presumibile che cresca in attendibilità con l'evoluzione del ciclo, se mai vorrà decidersi a decollare. Tutti i dettagli del metodo qui illustrato si possono trovare su Wheatland, M. S., 2001, Solar Physics, 203, 87 and Moon et al., 2001, Journal of Geophysical Research-Space Physics, 106(A12) 29951.

8) Conclusioni

L'enorme quantità di energia rilasciata dai Flares, aggiunta a tutta quella proveniente dal Sole segnatamente durante le fasi di massimo dei cicli solari, potrebbe influenzare negativamente anche in modo significativo i sistemi di comunicazione terrestri e, di riflesso, creare problemi non indifferenti anche di natura economica. E' possibile, applicando il modello illustrato nel testo, dare una stima previsionale sufficientemente attendibile degli accadimenti del Flares più "energetici", cioè quelli di classe C,M ed X. L'andamento del flusso nei Raggi X in due bande, tra 0.5Å e 4Å, e tra 1Å e 8Å è monitorato continuamente attraverso rilevamenti satellitari (per esempio tramite il satellite GOES). Tutte le misure relative ai Flares rilevati, oltre alle loro fotografie e riprese eseguite dallo spazio (per esempio da TRACE) sono opportunamente catalogati in modo da poter disporre in futuro dati sempre più precisi ed abbondanti, che potrebbero essere usati per elaborare modelli previsionali ancora più attendibili. In rete esistono decine di siti specializzati in questo campo: ne segnaliamo qui solo due, che sono forse i più conosciuti: quello dello Space Weather Prediction Center del NOAA (http://www.swpc.noaa.gov/) e quello del TRACE Flare Catalog (http://hea-www.harvard.edu/trace/flare_catalog/index.html). Sul primo sono disponibili, tra l'altro, pagine con l'andamento del flusso X nelle due bande indicate aggiornate una ogni 5 minuti e relativa agli ultimi 3 giorni, l'altra aggiornata ogni minuto e relativa alle ultime 6 ore.

I Numeri del Sole

Perché si contano le macchie?

di **Mario Gatti**

Osservatorio Solare, Istituto Istruzione Superiore "Valceresio"
Via Roma 57, 21050 Bisuschio (Varese)

Paperon de' Paperoni conta sempre i suoi soldi: non ho mai capito come fa, visto che possiede tre ettari cubici di denaro, ma lui può. Il suo sfortunatissimo nipote Paperino, invece, conta solo le fatture con le quali i suoi numerosi creditori gli contestano il suo stato di debitore permanente. Io conto le macchie solari. E non sono il solo, c'è tanta gente al mondo che lo fa. Molto spesso mi sento dire "*perché si contano le macchie solari*? *A cosa serve*?". In questi casi cerco di imbastire un qualche tipo di risposta, ma so già che il curioso (perché poi non si sarà fatto i fattacci suoi?) se ne andrà insoddisfatto e con il dubbio ancora più forte, pensando che io non abbia niente di meglio da fare nella vita che passare le giornate in questo modo. Già, forse sarà solo un passatempo.

Ovviamente una risposta sensata c'è e non è nemmeno difficile da capire. Il fatto è che ci vorrebbe troppo tempo per darla lì così, suoi due piedi. Allora mi è venuto in mente di farlo scrivendo questo articolo: vorrà dire che quando me lo chiederanno ancora *Meridiana* avrà guadagnato dei lettori in più. Lasciamo da parte gli scherzi adesso e vediamo prima di tutto di dire qualcosa sul Sole, che poi potrebbe rendersi utile nel seguito, cominciando con un'affermazione tanto ovvia da apparire stupida: *il Sole è una stella*. Se vi sembra una banalità, provate a chiedere in giro quale è la stella più vicina alla Terra, e divertitevi a sentire le risposte (la più gettonata è Alpha Centauri, ma c'è gente che tira in ballo Giove o addirittura la Luna). Grazie al cielo qualcuno risponde che è il Sole. Per la vita sulla Terra e per chi si occupa di Fisica, Chimica, Biologia, Meteorologia e altro, di certo non è però una stella come tutte le altre. Proprio perché è la più vicina (solo 150 milioni di Km. circa, distanza conosciuta anche come Unità Astronomica o UA) ci mantiene in vita e ci permette di utilizzarla come vero e proprio laboratorio di astrofisica, per saperne di più su di lei ed avanzare ipotesi (che spesso trovano ottime conferme) sulla struttura e l'evoluzione delle altre stelle nell'universo.

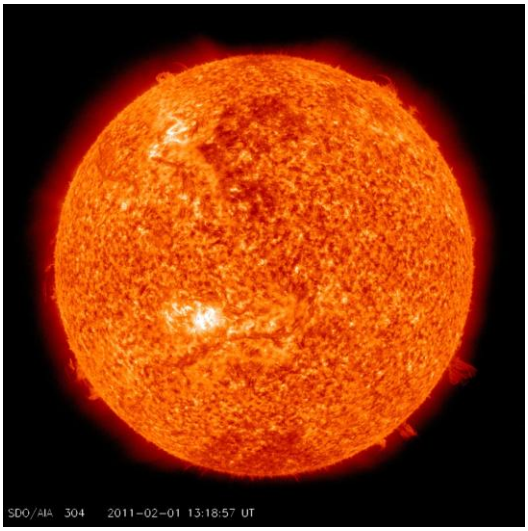


Fig. 1: *Il Sole fotografato nell'ultravioletto estremo a 30,4 nanometri nella riga di emissione dell'He II. (Cortesia: SDO/AIA)*

Per dare qualche informazione sulla struttura del Sole cominciamo dalla sua parte più interna, il *nucleo*: qui è concentrata la maggior parte della sua massa e approssimativamente in una sfera di raggio pari ad un quarto di quello della stella viene prodotto il 99 per cento della sua energia. La fonte dell'energia solare è la fusione nucleare: nuclei di Idrogeno vengono per così dire uniti, fusi appunto, per dare nuclei di Elio. In questo processo la massa non si conserva ed il risultato è la produzione di energia. Ogni secondo vengono convertiti in energia $5x10^9$ Kg. di massa. Chiaro che questo non è un processo che può durare all'infinito. Già ora, stimando in 4500 milioni di anni l'età del Sole, buona parte della massa iniziale di Idrogeno se ne è andata, ma possiamo stare tranquilli. A questo ritmo (sempre che non intervengano meccanismi a noi sconosciuti) la produzione di energia andrà avanti per almeno altri 5 miliardi di anni, milione più, milione meno, prima che l'evoluzione della Stella, secondo i modelli evolutivi attualmente accettati, trasformi il Sole prima in una gigante rossa e poi in una nana bianca, ma sicuramente nessuno di noi umani sarà qui a godersi lo spettacolo.

Fino ad una distanza di circa 0.7 raggi solari, il trasporto di energia avviene essenzialmente per radiazione; oltre questo limite, che in Fisica Solare è conosciuto con il nome di *tacochline*, e fino quasi alla "*superficie*" (più avanti vedremo perché questo termine è bene che venga scritto tra virgolette) subentrano complessi meccanismi di convezione ed il materiale della stella si può suddividere in quelle che vengono chiamate *zone di convezione*. Le più fini di queste appaiono ai più potenti telescopi come delle celle, dette *granuli*, delle dimensioni di circa 1000 Km. E' abbastanza ovvio pensare che anche per altre stelle le cose vadano allo stesso modo ed in effetti per una di esse, Betelgeuse, è stato possibile già parecchi anni fa (1974) osservare con chiarezza la granulazione fine della "superficie" della stella, grazie ad una tecnica detta Interferometria a macchie.

La "superficie visibile" del Sole, la *fotosfera*, è costituita da queste strutture di convezione. La fotosfera appare come un disco nettamente definito, con un bordo regolare e apparentemente perfettamente circolare. A questo punto sorge spontanea una domanda: ma se il Sole è una stella, cioè un qualcosa che di certo solido non è, come mai ci appare come un disco regolare, quasi che ci si possa planare sopra, trascurando il fatto che la navicella finirebbe fusa? La materia di cui è fatta la fotosfera è in continuo mutamento, le cellule di granulazione non hanno una struttura stabile (questa affermazione è dimostrata dai cosiddetti *spostamenti Doppler* delle frequenze della luce emessa da Sole), allora, perché in fondo il Sole sembra solido?

La risposta è che la maggior parte della radiazione visibile che osserviamo guardando il Sole proviene da uno stratarello, un anello di stella di circa 500 Km di spessore. Per una serie di motivi non complicatissimi, ma che in questa sede non è il caso di tirare in ballo e dovuti all'attraversamento della materia stellare dai parte della radiazione elettromagnetica, per i nostri occhi al di sotto di questo sottile strato il Sole è opaco, al di sopra è trasparente. Risultato: ci sembra di vedere un contorno definito anziché un globo incandescente che si perde nello spazio.

Se però non ci limitiamo all'osservazione visuale del Sole, ma esaminiamo delle immagini catturate con telescopi e apparecchiature particolari, riusciamo a capire che in effetti la nostra è solo un'illusione: il Sole non ha un confine così definito come appare e che, per una meraviglia della natura, ha le stesse dimensioni (quasi sempre, dipende dalle loro distanze relativamente alla Terra) della Luna piena; se non fosse così, non potremmo osservare le eclissi totali.

Prima di passare ad altro, vale la pena quindi di far notare che quello che chiamiamo "raggio" del Sole è la distanza dal centro al limite della fotosfera. Un vero "raggio", e quindi una vera "superficie" le stelle semplicemente non li hanno. Sono comunque termini entrati nell'uso comune anche nella comunità scientifica e tutti ne fanno largamente uso.

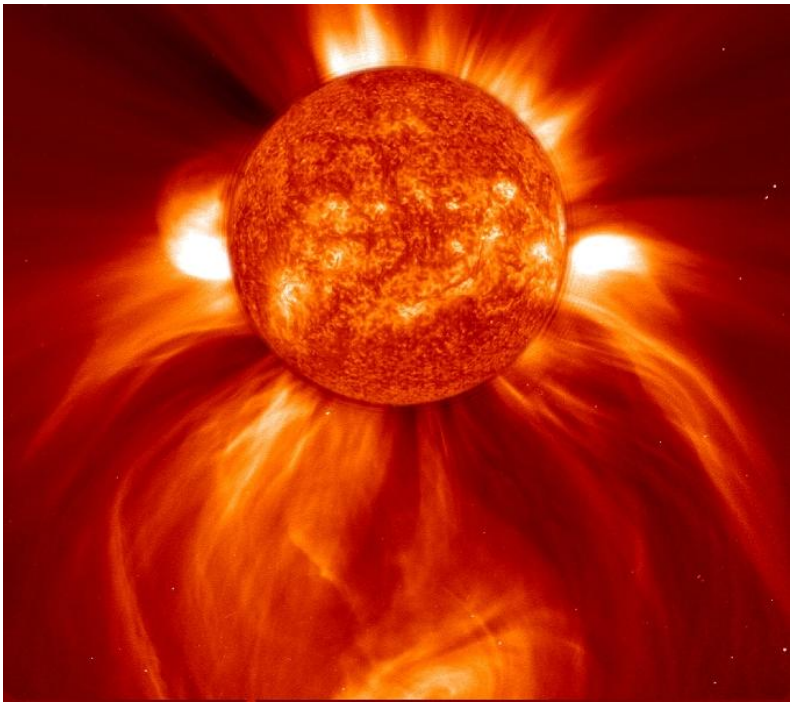


Fig. 2: *Spettacolare immagine del Sole ottenuta combinando due immagini nell'ultravioletto che evidenziano la cromosfera e la corona con alcune emissioni coronali. (Cortesia SOHO/EIT/LASCO)*

Una volta chiarito che il Sole non finisce lì dove ci sembra che finisca resta da capire che cosa viene dopo, oltre la fotosfera. La parte della stella per così dire successiva è la *cromosfera*. Questo nome, che letteralmente significa sfera di colore, deve però forse il suo nome al fatto che quando si riesce ad osservarla ad occhio nudo, durante un'eclisse totale, appare come un bagliore, una falce sottile di luce rosa – rossastra. La cromosfera, che ha uno spessore di circa 2000 Km. non ha una temperatura costante, ma cresce verso l'esterno, fino a raggiungere e superare anche i 60000 K. E' solcata da piccoli (relativamente al Sole, chiaro) getti di gas luminosi, chiamati *spicole*: possono raggiungere un'altezza sopra l'ideale confine della cromosfera anche di 10000 Km. e sono di breve durata, dai 2 ai 10 minuti. Sia dal punto di vista della temperatura (in costante aumento), sia da quello della distanza dal centro dell'astro, la cromosfera sfocia poi nella *corona solare*, regione di bassa densità ed altissima temperatura, che può raggiungere anche i due milioni di gradi, ovviamente nemmeno lei dai contorni definibili e spesso sede di eventi di grande energia, detti EMC o emissioni massive coronali. La corona si trova in uno stato di equilibrio per così dire dinamico, espandendosi in forza della sua temperatura contro il campo gravitazionale del Sole stesso. La materia di cui è composta la corona viene emessa nello spazio spesso in modo violento e spettacolare e va a formare il vento solare, che interagisce fortemente con il campo magnetico dei pianeti, quindi anche con quello della Terra in particolare.

E' in questo senso che l'affermazione "la Terra si trova dentro il Sole" è pienamente giustificata.

E poi cosa c'è ancora? La storia non finisce di certo qui: la riprenderemo parlando dell'attività del Sole, di cui le macchie solari, per le quali come vedremo molti si sono ingegnati a trovare spiegazioni quanto meno ... originali, come quella che sosteneva che fossero "buchi nelle nubi di fuoco" del Sole, che potevano condurre a zone addirittura abitabili, costituiscono il fenomeno più facile da osservare e catalogare.

Le macchie solari

Le macchie sono il fenomeno più evidente dell'attività del Sole: si possono osservare facilmente, anche con strumenti di modeste dimensioni e le più grosse sono spesso visibili persino ad occhio nudo. L'osservazione delle macchie solari, visto che compaiono sulla fotosfera, la "*superficie visibile*" del Sole, non presenta alcuna difficoltà, anche con un semplice binocolo. Diverso è il discorso del conteggio delle macchie, che richiede molta pazienza, strumenti adatti e stabili ed anche abilità grafiche, visto che molti osservatori si dilettano a produrre dei disegni della fotosfera.

Disegno che si esegue su un immagine del disco solare ottenuta in proiezione attraverso strumenti ottici, o con l'osservazione diretta della stella a patto di utilizzare le opportune protezioni per gli occhi, dette filtri solari. Attenzione però:si deve assolutamente diffidare di certi aggeggi che sono in circolazione, come i piccoli filtri che si avvitano sugli oculari dei telescopi: questa roba non dovrebbe nemmeno essere messa in commercio (oltretutto costano poco, quindi si è invitati ad acquistarli e spesso sono compresi nella dotazione di base quando si compra uno strumento amatoriale) e se ne avete uno datemi retta, spaccatelo e buttatelo via prima che vi venga la tentazione di usarlo.

Essendo molto vicini all'occhio gli mandano dentro un sacco di radiazione e di calore e, se dovessero rompersi, il malcapitato osservatore potrebbe non fare in tempo ad allontanare l'occhio dall'oculare senza aver subito danni anche gravissimi. Di fatto assolutamente sicuri, ma decisamente più costosi sono i filtri solari a tutta apertura, cioè quelli che si posizionano per così dire all'ingresso del telescopio: filtrano la radiazione prima che arrivi nell'oculare riflessa dagli specchi e concentrata dalle lenti e sono quelli che possono essere usati per l'osservazione diretta.

Sono molto usati quelli costruiti con un materiale polimerico chiamato Mylar e recentemente sono stati messi in commercio materiali ancora migliori (Astrosolar). In ogni caso i filtri solari vanno usati con molta attenzione. Il modo più sicuro per osservare il Sole è sempre la proiezione.

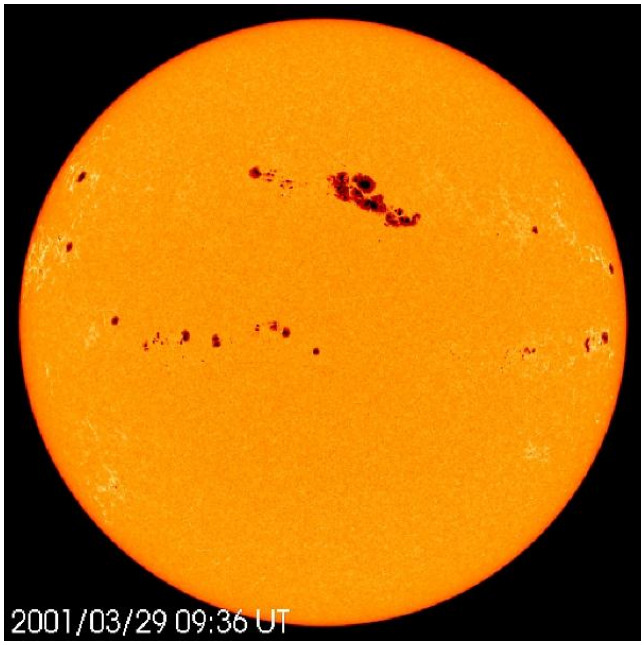


Fig.3: *La fotosfera con molti gruppi di macchie durante l'ultima fase di massimo dell'attività solare. Cortesia: SOHO/MDI.*

Pur apparendo scure (infatti si chiamano macchie), sono in realtà molto brillanti e se si potesse idealmente eliminare il resto della fotosfera le vedremmo luccicare fortissime nel cielo nero. Infatti le macchie solari sono zone della fotosfera a temperatura decisamente più bassa del normale

(intorno ai 4000 - 4500 gradi in media), quindi appaiono scure solo perché sono in contrasto con uno sfondo molto più luminoso di loro. Né più né meno come noi ci accorgiamo delle schifezze (macchie, ditate, impronte del gatto) che abbiamo sul parabrezza dell'auto non certo quando siamo al buio dentro una galleria, ma quando siamo contro la luce del Sole o quando incrociamo i fari di un altro veicolo. Ma quali saranno mai le cause di questo fenomeno, osservato già nei tempi remoti dell'umanità, noto agli astronomi greci e riscoperto in tempi per così dire più recenti, dopo l'invenzione del telescopio da parte di Galileo Galilei nel 1611?

Ebbene, alcune spiegazioni appaiono oggi molto bizzarre e ci fanno decisamente sorridere: alcuni pensavano che si trattasse di ombre di pianeti interni all'orbita di Mercurio, altri che fossero montagne che si innalzavano sopra la fotosfera. E mica tutti questi signori erano degli inesperti faciloni: lo stesso Galileo attribuiva alle macchie l'ipotesi che fossero nubi, mentre il grande astronomo William Herschel le spiegava ricorrendo a buchi nella superficie del Sole, che potevano essere dei passaggi verso zone più interne ed addirittura abitabili.

L'origine delle macchie va ricondotta al campo magnetico del Sole, che ha una struttura piuttosto complicata e decisamente poco uniforme nel tempo e nella stella stessa, visto che il Sole è fatto di plasma (gas ionizzati ad elevata conducibilità elettrica) e non è un pezzo di ferro calamitato. Semplificando al massimo il discorso possiamo dire che la macchie solari derivano da alterazioni locali del campo magnetico del Sole, che "erompe" in fotosfera dalla zona convettiva sottostante, creando delle strutture locali dipolari che sono le macchie.

Le più recenti teorie ritengono che il ruolo del campo magnetico sia quello di limitare i moti convettivi all'interno delle macchie, che risulterebbero quindi più fredde, o per meglio dire meno calde, per la diminuita efficacia del trasporto di energia rispetto al resto della fotosfera. E' come se il plasma di cui è costituita la stella si comportasse alla stregua di un mezzo termicamente isolante.

A sicura dimostrazione che il campo magnetico del Sole e le macchie siano strettamente correlati disponiamo dei cosiddetti magnetogrammi, una sorta di mappe magnetiche del Sole, dove vengono evidenziate le cosiddette Regioni Attive, che appaiono come zone chiare e scure vicine: la parte chiara rappresenta per così dire un polo, mentre l'altra quello opposto. Anche se non sempre una Regione Attiva presenta delle macchie in fotosfera, quando queste sono presenti appaiono sempre in corrispondenza delle Regioni Attive. Gli intensi campi magnetici presenti nelle macchie possono essere rilevati anche grazie al cosiddetto effetto Zeeman, una cosa un po' complicata da spiegare qui, ma che consiste essenzialmente nella presenza di frequenze della luce per così dire aggiuntive nello spettro della radiazione solare, che non possono essere spiegate senza ricorrere ai campi magnetici.

Le macchie possono essere estremamente piccole, al punto che a volte non vengono classificate nemmeno come tali, ma semplicemente indicate come "pori", quando le loro dimensioni vanno dai limiti di risoluzione degli strumenti ai 2000 - 3000 Km. al massimo, o addirittura enormi: le loro dimensioni medie sono calcolabili intorno ai 10000 Km. ma ne sono state osservate di grandissime, anche di 150000 Km. o più. Come dire che una macchia di queste potrebbe ospitare al suo interno diversi pianeti grandi come la Terra.

La regione nera e scura dell'interno delle macchie è chiamata *ombra* e la frangia più luminosa o per meglio dire meno scura che spesso le circonda, soprattutto nel caso di quelle più grandi, è detta *penombra*. Le macchie persistono per vari giorni sulla fotosfera e sono sempre organizzate in *gruppi*, dalla struttura spesso complessa ed articolata. Si presentano sia nell'emisfero Nord che in quello Sud della stella ed hanno velocità di migrazione diverse a seconda che siano più o meno vicine all'equatore dove, non dimentichiamo la *rotazione differenziale* della nostra stella, il Sole ha un periodo di rotazione minore che ai poli, cioè gira più rapidamente su stesso all'equatore che ai poli, però limitatamente alla zona convettiva: al di sotto di questa ruota come un corpo rigido.

Quando le macchie si avvicinano al bordo del Sole la loro osservazione permette di chiarire che sono depressioni nella fotosfera e non elevazioni su di essa: infatti nei pressi del bordo il lato di una macchia più vicino all'osservatore tende a scomparire, mentre quello opposto continua ad essere osservato, anzi aumenta di dimensioni: questo fenomeno è noto come *Effetto Wilson*.

Quello che ci preme di più ora è capire come si possono osservare e classificare macchie e gruppi. I primi a proporre un sistema metodico, scientifico ed organizzato sono stati gli astronomi della Scuola di Zurigo, con il loro capostipite Rudolf Wolf, che nel 1848 propose il calcolo di un indice dell'attività fotosferica del Sole che, seppur con qualche aggiustamento e variazione, ancora oggi è usato nella comunità scientifica come metodo standard. Si tratta del cosiddetto Numero di Wolf, che si ottiene dalla semplice formula:

$$\mathbf{R = Kc(10G + F)}$$

dove G rappresenta il numero totale di gruppi osservati, F quello totale di macchie presenti, somma di tutte quelle rilevate per ogni grupp e Kc è un coefficiente correttivo dipendente dall'osservatore, dal suo entusiasmo, o se vogliamo dal suo pessimismo, nel contare macchie e gruppi, dallo strumento impiegato e dalla qualità delle immagini. Alcuni osservatori astrofili calcolano questo coefficiente per i fatti loro, utilizzando delle formulette che si possono reperire facilmente anche in rete o su qualche testo specializzato.

In realtà la questione di Kc è un po' diversa: fino al 1982 i numeri di Wolf calcolati da osservatori accreditati venivano raccolti ed elaborati a Zurigo, mentre ora se ne occupa il Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) di Bruxelles, che gestisce un network di Osservatori sparsi in tutto il mondo che giornalmente inviano i loro numeri di Wolf. Il coefficiente Kc (detto anche fattore di riduzione) viene calcolato per ogni Osservatorio accreditato presso il SIDC utilizzando metodi piuttosto complicati che di fatto rapportano le varie osservazioni a quelle effettuate negli anni di Wolf (il cui fattore di riduzione è convenzionalmente posto uguale a 1).

Non importa quale sia il valore di Kc, ma importa che resti costante nel tempo, garantendo così la costanza e l'attendibilità di un osservatore. Il risultato dell'analisi dei dati prodotta dal SIDC sono i cosiddetti *ISN o International Sunspots Numbers* (numeri di macchie internazionali), che vengono pubblicati con cadenza trimestrale e tengono conto di tutte le osservazioni inviate al SIDC corrette con gli opportuni fattori di riduzione.

L'elaborazione dei dati però è talmente complessa che di solito gli ISN relativi ad un certo trimestre possono venire pubblicati anche con un ritardo di 5-6 mesi. Sono proprio gli ISN la chiave della risposta alla domanda "Perché si contano le macchie": sono infatti una sorta di termometro che misura la febbre del Sole, cioè se si trova in un periodo di scarsa, media o forte attività, per lo meno per quanto riguarda la fotosfera. Il fatto è che quello che accade in questa zona della stella, quindi la presenza di più o meno macchie, non è affatto scollegata da tutto quanto succede sopra di essa, cioè nella cromosfera e soprattutto nella corona solare.

Da queste zone hanno origine certi eventi che influenzano pesantemente il nostro pianeta, sicuramente producendo dei disturbi elettromagnetici ma forse (la questione però è bene dire che è ancora aperta e dibattuta) contribuiscono anche alle variazioni climatiche della Terra, se pur non su scale di tempi brevi.

Perciò il conteggio delle macchie non è che il primo anello di una lunga catena che parte dal Sole, passa dalla Terra e va ben oltre, al di là dei confini del Sistema Solare, fino ad una zona, detta *elio pausa*, dove gli effetti del vento solare non riescono più a farsi sentire. Chi conta le macchie quindi fa un lavoro paziente ed umile, ma senza quello sarebbe molto più difficile capire come diavolo funziona la nostra stella, tanto è vero che gli ISN sono quasi sempre usati come variabile di

riferimento negli studi di fisica solare e sono rapportati a molti altri aspetti dell'attività della stella.

E in fondo sono la cosa più immediata da ottenere, perché il conteggio delle macchie è di sicuro l'aspetto più semplice ed alla portata di tutti, anche con strumenti modesti, dell'osservazione del Sole.

Quello che si ricava dall'analisi dei Numeri di Wolf, oltre che dalle annotazioni degli astronomi andando indietro nel tempo è che l'attività del Sole è praticamente ciclica: ogni 11 anni in media alterna un minimo ed un massimo, con conseguente variazione del numero di Wolf, anche se questa regolarità non sempre è stata così evidente: è famoso il cosiddetto *minimo di Maunder*, nome dato ad un periodo che va dal 1645 al 1715 circa, dove le macchie praticamente non furono quasi osservate.

Prende il nome dall'astronomo E.W. Maunder, che pur vissuto più tardi scoprì che in quel periodo, e segnatamente durante 30 anni al suo interno, gli astronomi dell'epoca riuscirono ad osservare solo 50 macchie, contro le normali 40000 - 50000. Ne approfitto qui per dire che Maunder ha dato il nome anche ad un particolare diagramma, detto "a farfalla", dal quale si deduce come le macchie tendano a migrare, nel senso della posizione in cui si manifestano, verso l'equatore del Sole partendo dalle zone vicino ai poli, durante un ciclo di attività (*Legge di Sporer*).

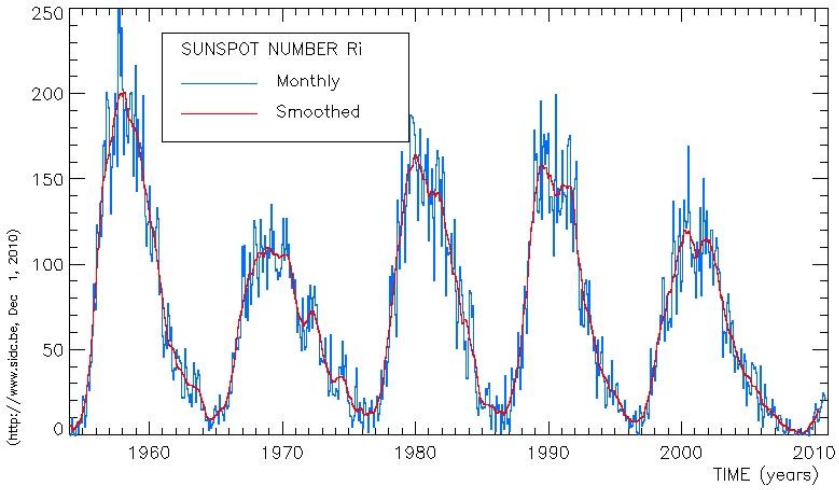


Fig:4*: un grafico nel quale si nota molto bene l'attività ciclica con media di 11 anni,l relativa agli ultimi 5 cicli (escluso quello in corso). Cortesia: SIDC.*

Difficilmente comunque si osservano macchie oltre una certa latitudine, anzi sono rarissime vicino ai poli. A voler essere più precisi, questa periodicità ha un periodo doppio e segue quelle che in Fisica Solare sono conosciute come "*Leggi di Hale*". Infatti in ogni ciclo (inteso di 11 anni) le Regioni Attive dell'emisfero Nord e quelle dell'emisfero Sud, pensate semplicemente come dipoli magnetici, presentano una certa polarità, ad esempio il polo positivo a sinistra e quello negativo a destra, esattamente opposta. Questa polarità si inverte nei due emisferi nel ciclo degli 11 anni successivi: quindi da un punto di vista, per così dire, magnetico un vero ciclo di attività dura 22 anni circa. Di fatto è tutto il campo magnetico del Sole che si inverte ed in ogni ciclo undecennale le regioni attive presentano come polarità precedente (nel senso della rotazione del Sole) quella dell'emisfero in cui si presentano, ma la spiegazione del perché tutto questo succeda è molto complessa, ci sono diverse ipotesi ed è ancora oggetto di molti studi da parte degli astronomi.

Non solo macchie

Una volta capito che il conteggio delle macchie è l'ideale base della piramide dell'osservazione solare, diamo uno sguardo rapido a cosa ci propone la nostra stella, riservandoci di entrare in maggiori dettagli in articoli successivi. L'attività del Sole è molto variegata e complessa e va ben al di là del fenomeno delle macchie che abbiamo esaminato fin qui.

Tipici e famosi esempi di attività della stella sono per esempio i *flare*: si tratta di fenomeni transitori: la loro durata va da qualche minuto a poche ore, dipende da quale porzione dello spettro elettromagnetico si considera. Nei flare sono in gioco energie paragonabili addirittura a milioni di esplosioni di ordigni nucleari (si veda in proposito l'articolo "Flare Solari" su *Meridiana*, N° 209, pagg. 15-25). Nelle immagini della cromosfera e della corona appaiono come zone estremamente brillanti. I flare vengono suddivisi in classi in base alla loro luminosità, invece che secondo la loro morfologia, come invece si fa nel caso dei gruppi di macchie, ed alle frequenze di luce nelle quali compaiono , tipicamente i Raggi X per quelli più intensi e la cosiddetta Riga H-Alfa dell'Idrogeno in luce visibile.

Appaiono con più frequenza nei periodi di massima attività solare, anche parecchi al giorno e si diradano quando il Sole si tranquillizza, in media uno alla settimana nei periodi di minimo di attività. Quelli di classe X, i più energetici, tendono invece a presentarsi maggiormente nella fase calante di un ciclo di 11 anni, anche se il loro numero è sempre piuttosto piccolo. Associate ai flare si possono a volte osservare onde d'urto spettacolari (dette *Onde di Moreton* quando si accompagnano anche ad emissione di materia nella corona) che qualcuno ha battezzato gli *Tsunami del Sole* e che si propagano nella stella quasi come quelle generate da un sasso lanciato nell'acqua, alle quali assomigliano da un punto di vista visivo, ma non certo per la loro origine. Un flare è un po' come una bomba ad orologeria: può impiegare molto tempo per accumulare energia e poi rilasciarla all'improvviso.

Un'altro fenomeno decisamente spettacolare sono le *protuberanze*: si tratta di getti di plasma lanciati nello spazio dalla cromosfera, che si estendono verso la corona. Si formano nell'arco di qualche ora e possono durare anche qualche giorno. Spesso si "spezzano" e si accompagnano a flare di grandi dimensioni. Anche loro sono più facilmente osservabili al bordo del disco solare ed alcune sono davvero impressionanti: può capitare di osservarne alcune che hanno dimensioni vicine a quelle del raggio del Sole, quindi di circa mezzo milione di Km. o più.

Le protuberanze si distinguono tra eruttive e quiescenti: le prime sono di durata piuttosto limitata, le seconde sono osservabili per più tempo, a volte anche per qualche giorno. Se ci chiediamo cosa possa vincere il campo gravitazionale del Sole, che dovrebbe far ricadere rapidamente una protuberanza verso le parti inferiori dell'atmosfera della stella, la risposta si trova ancora una volta nelle proprietà del campo magnetico. L'interazione tra il moto del plasma solare ed il campo magnetico della stella produce una forza (*forza di Lorentz*) che si dimostra essere diretta verso l'esterno del Sole, compensando così,fin quando le riesce, l'effetto della forza di gravità del Sole.

Le protuberanze si osservano con tecniche e filtri particolari, nelle frequenze dell'ultravioletto intorno ai 30 nm oppure nell'emissione di una frequenza particolare dovuta all'Idrogeno (H-Alfa). Gli strumenti adatti all'osservazione e alla fotografia delle protuberanze sono molto costosi: il loro prezzo supera abbondantemente quello di un intero telescopio semi professionale, specialmente se hanno una banda passante stretta, cioè se tagliano più accuratamente tutta la radiazione per così dire parassita, lasciando passare solo quella nella quale le protuberanze hanno la loro massima emissione. Non mancano comunque strumenti dal prezzo decisamente più abbordabile, che offrono comunque buone prestazioni anche in rapporto al loro costo ed alla banda passante non strettissima che offrono.

Purtroppo sono poco adatti per la fotografia astronomica, ma danno grande soddisfazione ugualmente all'osservazione visuale. Le protuberanze, così come le macchie, sono conteggiate dagli osservatori più assidui ed appassionati ed hanno a loro volta dei tipi di classificazione. Per il conteggio viene valutato il cosiddetto Indice di attività al lembo, che si calcola, con le dovute differenze, più o meno come il numero di Wolf per le macchie solari. La classificazione può seguire (come del resto anche per le macchie) diversi schemi, tra i quali i più conosciuti sono quelli di Volker e di Zirin.

Fig.5: *notevole protuberanza eruttiva fotografata in luce ultravioletta. Cortesia: SOHO/EIT*

La corona è a sua volta sede di eventi a volte particolarmente drammatici dal punto di vista energetico: si tratta delle EMC (CME se vogliamo usare l'acronimo originale inglese *Coronal Mass Ejections*) o *Emissioni Massive Coronali*. Anche qui siamo in presenza di plasma per così dire espulso, *sparato* come si dice in gergo, dal campo magnetico del Sole e costituito da elettroni, protoni e quantità residue di ioni e nuclei di altri elementi.

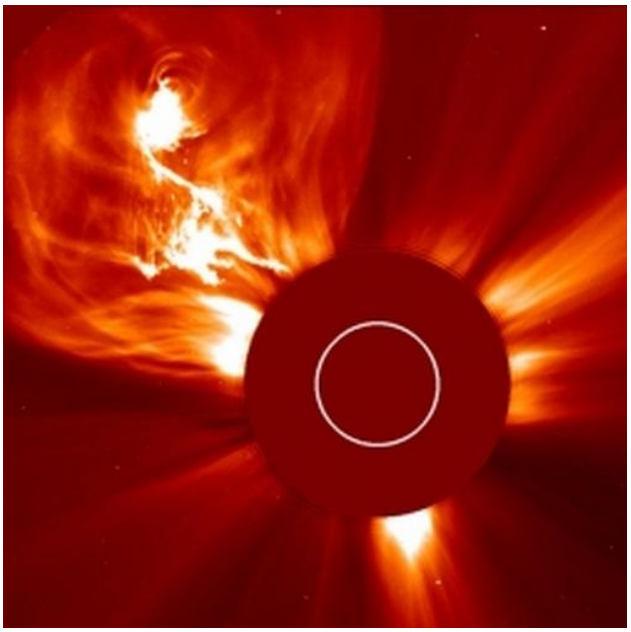


Fig. 6: *spettacolare EMC fotografata in luce ultravioletta con un coronografo, uno strumento che occultando la fotosfera rende possibile la visione della corona come durante un'eclissi totale di Sole. Cortesia: SOHO/LASCO*

A volte gli EMC sono diretti verso la Terra e possono provocare al loro arrivo dei disturbi soprattutto di tipo elettromagnetico. Un'altra cosa evidente in corona sono i *buchi coronali*, zone dell'atmosfera della stella da cui proviene meno radiazione, osservabili molto bene soprattutto nei Raggi X. Durante i minimi dei cicli si presentano prevalentemente ai poli, poi tendono ad estendersi verso l'equatore del Sole mano a mano che il ciclo procede verso il massimo.

Ai buchi coronali è associata l'emissione del *vento solare*, costituito da fasci di particelle molto energetiche. Questa roba viaggia nello spazio a velocità a volta impressionanti (anche fino a 1200 Km. al secondo) e quando raggiunge la Terra ne disturba il campo magnetico, la *magnetosfera*, letteralmente comprimendola nella direzione da cui arriva e stirandola in quella opposta. In condizioni di forte velocità ed alta densità, unitamente ad una particolare caratteristica del campo magnetico che viaggia con loro, le particelle cariche del vento solare riescono a penetrare nella magnetosfera e cominciano ad interagire con il plasma della ionosfera terrestre: i risultati di questa interazione spesso sono il disturbo o addirittura l'interruzione di trasmissioni radio o il danneggiamento di satelliti, mentre l'effetto più spettacolare prodotto è quello delle *aurore*, boreali o australi che siano.

Quando questi fenomeni sono particolarmente intensi, ed associati a forti emissioni di radiazione nel dominio delle onde radio, detti *radio-bursts* si parla, con un termine molto pittoresco ma realistico, di *tempeste solari*. Anche se durante le tempeste solari non piove e non grandina ma c'è il vento, che non è però quello che sradica gli alberi. Esiste una vera e propria "meteorologia solare" che studia il tempo sulla nostra stella, con tanto di osservazioni e previsioni, proprio come si fa con il meteo terrestre. Però nessuno ce le fa vedere in TV dopo i vari telegiornali ...

In conclusione, le macchie solari non sono altro che la "controparte fotosferica" di tutto questo. Se partendo dal loro semplice conteggio (al di là di tutto il resto, la classificazione dei gruppi, gli ISN eccetera) in ultima analisi si può prevedere se una sfuriata del Sole potrà mettere a rischio il nostro telefono cellulare o impedirci di aggiornare il nostro profilo su Facebook bè … pur non essendo i cellulari e Facebook le cose più importanti al mondo, ecco che però la cosa ci può toccare da vicino, molto da vicino e chissà quali e quante conseguenze, anche molto più serie e preoccupanti, potrebbero derivarne. Così, una volta che sono in qualche modo punti sul vivo, tutti possono rendersi conto del *perché si contano* le macchie e *a cosa serve* farlo [1].

1. Ovviamente l'importanza dello studio e del conteggio della macchie solari va ben al di là della possibile previsione di eventi energetici (anche se è vero che ne costituisce la base, l'ossatura). Ma questo è senz'altro l'aspetto che più colpisce tutti noi, sicuramente perché ci accorgiamo che potrebbe coinvolgerci in prima persona.

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 si 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 disopra, perlomeno per l'occhio umano. In secondo luogo è si 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 lenght*. 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 lenght appunto, prima di dissolversi e mettersi in equilibrio termico con il mezzo stesso. La mixing lenght 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 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. 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.

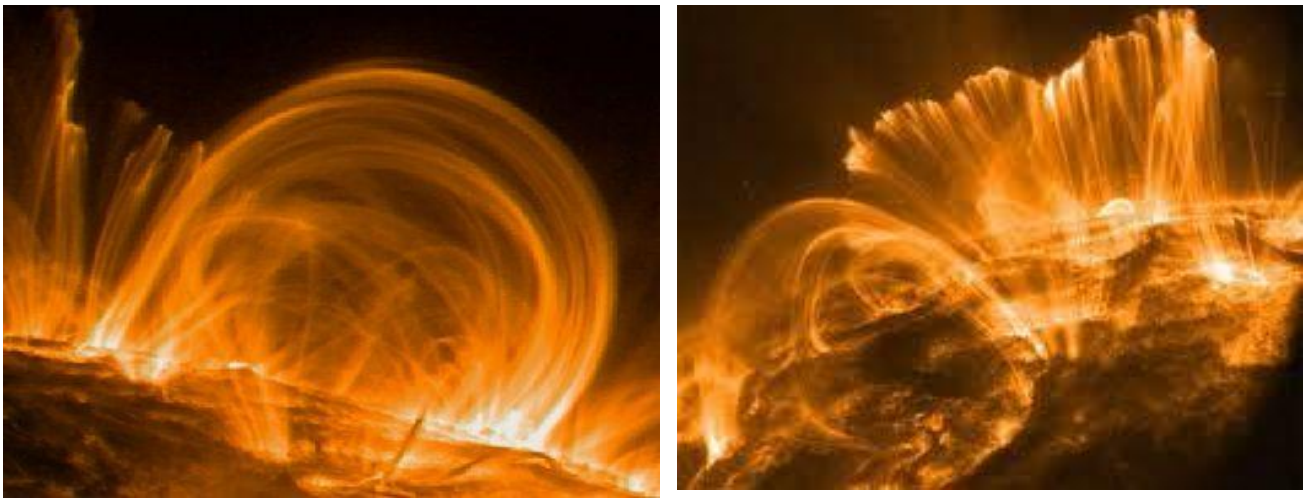


Figura 2: Loops (archi) coronali ripresi nell'ultravioletto estremo dalla sonda TRACE. Queste strutture sono un'effettiva visualizzazione del campo magnetico coronale, che viene trascinato dal moto del plasma coronale. (Cortesia: windows2universe.com & arstecnica.com)

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 una 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:

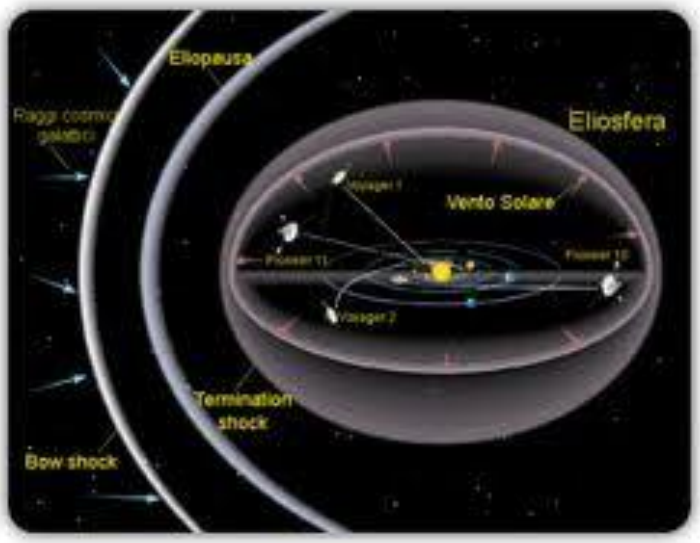


Figura 3: L'eliosfera e le altre zone descritte nel testo (Cortesia: nmdb.eu)

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 Coronograph) 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 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 delle 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_2 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 O_2^+. 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 sciami 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 cm^3 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 *plasmasfera*.

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 in nostri scopi, ci basta sapere che questa proprietà della ionosfera interessa in modo differenziato gli strati nei quali abbiamo visto viene suddivisa le 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 frequenza 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 dalla 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 voglio 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 si, 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, invorticati 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 induca 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*, coma 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 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 verifichino, 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 si 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 (si, per una volta tanto niente inglese), detto *bremsstrahlung*, 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. Si, 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.

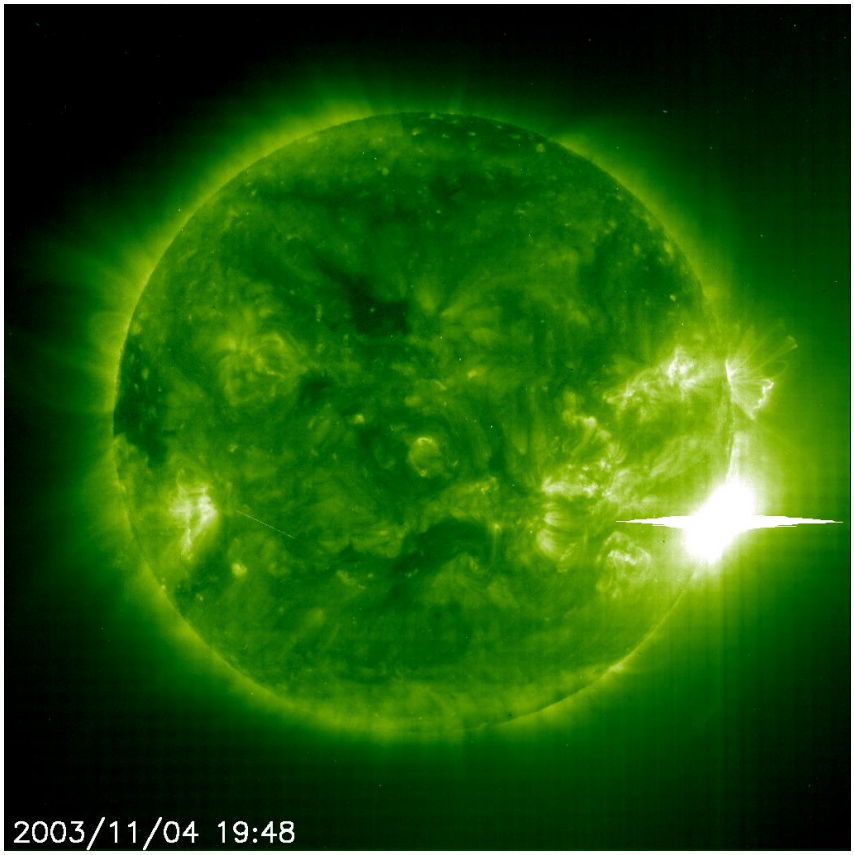


Figura 5: Impressionante flare di classe X28.2 ripreso dal telescopio EIT a bordo della sonda SOHO alla frequenza di 195Å, nell'ultravioletto estremo. Eventi come questo, con le giuste caratteristiche di direzionalità, possono provocare blackout radio ed altri effetti di portata estrema, in grado di 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 bizze 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 ridurne 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 pioverà".

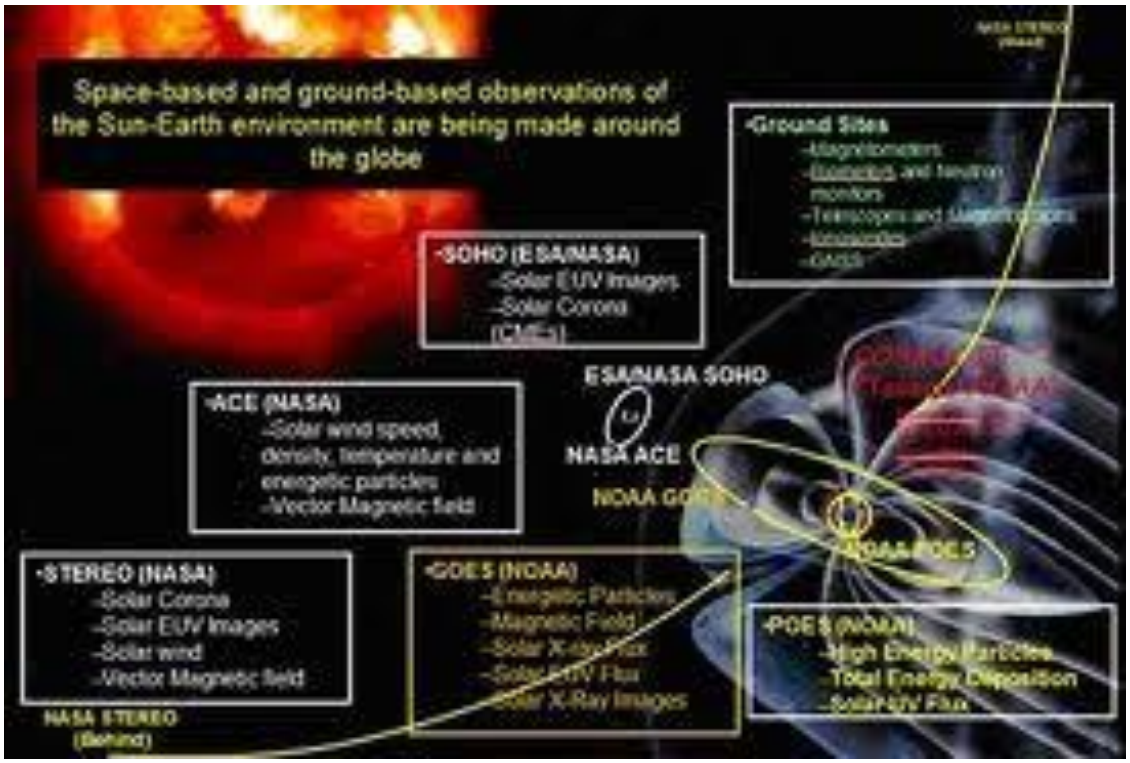


Figura 6: Le "sentinelle del Sole", complicatissima rete di satelliti e sonde con il compito di sorvegliare continuamente la nostra stella nel tentativo di prevedere l'arrivo di possibili disturbi di forte intensità. (Cortesia: washingtonpost.com)

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:

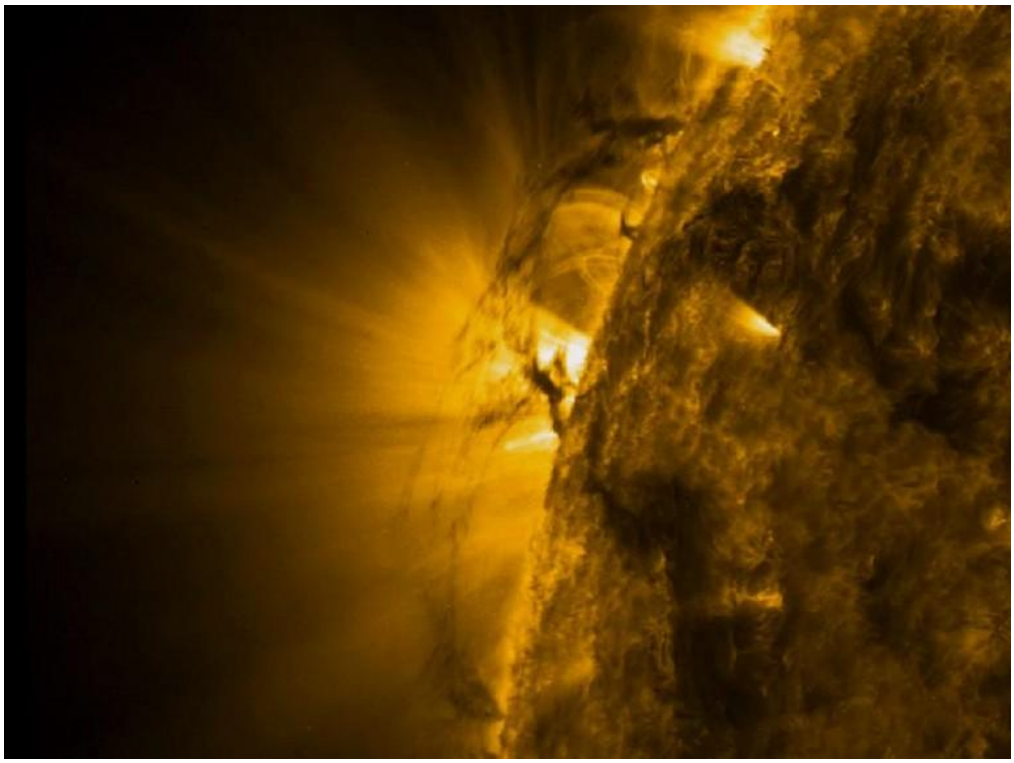


Figura 7: Un normalissimo loop coronale spacciato per "tornado solare".
Fonte: http://www.giornalettismo.com/archives/228368/il-tornado-solare-grande-cinque- volte-la-terra/

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.

Gli scherzi del Sole

La nostra stella sembra divertirsi a prendere in giro i suoi osservatori.

Mario Gatti

Osservatorio Solare
Istituto di Istruzione Superiore "Valceresio" – Via Roma 57, 21050 Bisuschio (Varese)

Che l'attività del Sole segua un andamento ciclico in generale e segnatamente per quanto riguarda le macchie solari è un dato accertato già dalla metà dell'800, in seguito ai lavori di Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875) e soprattutto di Johann Rudolf Wolf (1816-1893). Fu quest'ultimo in particolare a proporre un metodo quantitativo che conduce alla determinazione di un parametro, il numero di Wolf, ancora oggi usato dalla maggior parte degli osservatori solari come indice dell'attività del Sole per quanto riguarda le macchie solari e impiegato in quasi tutti gli studi di fisica solare come parametro di riferimento. Dal 1982 è attiva una rete di Osservatori solari che fa capo all'Osservatorio Reale del Belgio, dove ha sede il SIDC (Solar Influences Data Analysis Center). E' compito del SIDC rielaborare opportunamente i dati "grezzi" inviati da circa 80 Osservatori sparsi nel mondo per rendere noti quelli che si chiamano ISN o International Sunspots Numbers, in altre parole i numeri di Wolf "ufficiali", calcolati tenendo conto di tutte le variabili (o se preferite le complicazioni) introdotte dai vari osservatori, dal tipo di telescopio utilizzato, alle condizioni di osservazione, alla capacità di conteggio e via discorrendo (si veda a tal proposito la serie di articoli intitolati "I numeri del Sole", apparsi su Meridiana dal numero 212 al numero 215).

Grazie a queste precise analisi gli ultimi cicli solari sono stati molto ben studiati ed hanno confermato la loro periodicità media di circa 11.2 anni (Schwabe aveva indicato inizialmente una periodicità di 10 anni, corretta poi da Wolf in 11 anni circa). Chi però crede che, essendo stato studiato a fondo da Wolf e successivi assistenti e collaboratori tra Berna e Zurigo (cosa che continua ancora oggi con le osservazioni della Specola Solare Ticinese, che prosegue idealmente e praticamente il lavoro iniziato da Wolf quasi due secoli fa), il Sole si comporti con la tradizionale precisione di un orologio svizzero si sbaglia. Non tutti i cicli sono stati, non sono e con tutta probabilità non saranno uguali. Se ne conoscono alcuni più brevi, della durata di circa nove anni, altri più lunghi, che hanno sfiorato i 14 anni, mantenendo però la durata media di 11.2 anni ad oggi accettata.

In particolare quello attuale, che seguendo la numerazione iniziata nel 1755 e proposta dallo stesso Wolf porta il numero 24, è uno dei più strani, anomali, imprevedibili ma, permettetemi di dirlo, anche più affascinanti ed intriganti mai osservati. Le "stranezze" del ciclo 24 sono parecchie e per elencarle tutte ci vorrebbe di sicuro un articolo dedicato interamente a questo argomento (si veda comunque quello pubblicato sul numero 208 di Meridiana dal titolo "Ciclo solare 24: anomalie prevedibili"). Qui ci basti dire che, tra le tante, una su tutte ha stupito molto gli osservatori e gli studiosi del Sole: la durata del suo minimo iniziale. Normalmente tra un ciclo e l'altro esiste un periodo di alcuni mesi (detto di *overlapping*, cioè di sovrapposizione) in cui la fase finale di debole attività di un ciclo viene progressivamente sostituita dall'altrettanto debole fase iniziale di quello successivo, destinata poi a salire nel tempo verso il massimo che seguirà. Con le moderne tecniche di indagine del comportamento del Sole è possibile capire quasi con esattezza quando "comincia un

ciclo", studiando alcune caratteristiche magnetiche della stella che seguono una periodicità doppia di quella dei cicli delle macchie: ogni 22 anni circa infatti il campo magnetico del Sole fa un "giro completo", invertendo la sua polarità globale dopo 11 anni circa e ripristinando quella iniziale dopo gli altri 11. Quindi dal punto di vista magnetico, un ciclo solare dura circa 22 anni (mi scuso per l'uso eccessivo del termine "circa", ma è doveroso in questo contesto). Le zone del Sole dove compaiono le macchie (dette Regioni Attive, che si accompagnano anche ad altri fenomeni dell'attività solare come i flare) hanno delle ben precise caratteristiche magnetiche che possono essere osservate con i magnetogrammi, una sorta di "mappe magnetiche" del Sole. In base a queste caratteristiche è possibile stabilire se una certa Regione Attiva, in un periodo di *overlapping* ha caratteristiche tali da assegnarla al vecchio ciclo che sta morendo, piuttosto che a quello nuovo che sta nascendo. Nella fase di *overlapping* convivono spesso sul Sole Regioni di un tipo e dell'altro.

Ebbene, puntuale questa volta come un treno svizzero, il Sole ha fatto vedere la prima Regione Attiva con le caratteristiche giuste per poter dire che il ciclo 24 era iniziato il 13 Dicembre del 2007, esattamente sei anni dopo il periodo di massimo precedente, avvenuto nel 2001. La Regione in questione era però solo una Plage (o facola cromosferica), cioè non presentava macchie in fotosfera. La prima Regione attribuibile al ciclo 24 che ha prodotto macchie l'ha però seguita di poco, ed è apparsa il 4 gennaio del 2008, a una latitudine di quasi 30° Nord.

Quindi tutti felici e contenti di aver assistito al felice parto del ciclo 24. E invece no. Dopo c'è stato il deserto, il nulla quasi assoluto. Fino quasi alla fine del 2010, quindi con più di due anni di ritardo, il Sole si è divertito a giocare a nascondino con le macchie, producendone pochissime e per giunta a basse latitudini (di solito le prime macchie di un ciclo si presentano invece ad alte latitudini, anche oltre i 30° in entrambi gli emisferi), più volte anche con caratteristiche magnetiche tali da attribuirle al ciclo precedente, poi ha iniziato una lenta se pur progressiva risalita verso il massimo. Valga un dato su tutti: dal 10 Luglio al 1 Settembre del 2009 non si è vista traccia di macchie. Non accadeva da oltre 100 anni che un intero mese, se pur in fase di minimo, quello di Agosto 2009 in questo caso, trascorresse senza nemmeno l'ombra (è il caso di dirlo) di una macchia. Quindi la fase di *overlapping*, che fisiologicamente era stata di alcuni mesi almeno per gli ultimi cicli accuratamente studiati, per l'inizio del ciclo 24 è durata circa due anni producendo quello che è stato giustamente definito come un eccezionale minimo prolungato. Questo ha indotto coloro che si occupano di una cosa difficilissima, una delle più complicate di tutta la fisica solare, cioè la previsione della durata e dell'intensità di un ciclo, a produrre un modello di come avrebbe potuto comportarsi il ciclo 24 che viene illustrato, con le dovute spiegazioni, in figura 1. (Didascalia alla pagina seguente)

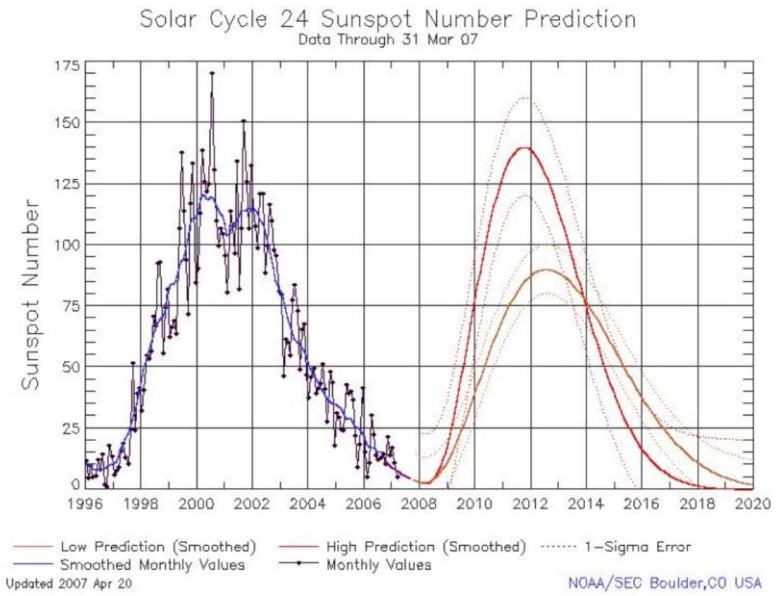


Figura 1. Modello previsionale dell'andamento del ciclo solare 24 elaborato da D.Hathaway e collaboratori nel 2007, quando il ciclo avrebbe dovuto iniziare a salire verso il massimo. All'epoca vi erano due tendenze: una che prevedeva un ciclo più "forte" del precedente, con un massimo nell'ultimo trimestre del 2012 e un'altra che al contrario prevedeva un ciclo più debole, con un massimo intorno al 2013. I due modelli sono evidenziati dalle relative curve a forma di parabola sulla destra. Le curve tratteggiate rappresentano i margini di errore sulla previsione dei numeri di Wolf. Poi il Sole ha di fatto smentito sia l'uno che l'altro modello. Notare come anche nel ciclo precedente, il cui andamento è riportato nello stesso grafico, si siano presentati due massimi in sequenza, uno tra la fine del 2000 e l'inizio del 2001, l'altro all'inizio del 2003. Nei grafici sono riportati gli ISN (curve continue) in funzione del tempo.

(Cortesia NOAA/SWPC)

E qui uno si potrebbe aspettare che, tenuto debitamente conto di quanto era successo nei primi due anni di questo ciclo pazzerello e con tutte le incertezze e gli errori del caso, il modello avrebbe potuto più o meno funzionare. Ma ancora una volta il Sole ha voluto prendersi gioco di noi e ci ha messo la zampino, comportandosi a modo suo, alla faccia dei suoi previsori di attività, con un andamento che fino ad oggi si è discostato di parecchio da quanto previsto dai grafici della figura 1. Qualcuno però sembra aver trovato una chiave non dico per spiegare, ma quanto meno per interpretare questo comportamento bizzarro (che poi magari bizzarro non è, ma è assolutamente normale, solo che a noi sembra strano solo perché non è allineato con quanto successo in passato almeno negli ultimi cicli. Molto spesso infatti ciò che semplicemente è incomprensibile viene etichettato come diverso o bizzarro, e non solo per quanto riguarda il Sole).

Richard C. Altrock, ricercatore dello Space Weather Center of Excellence all'Air Research Laboratory di Sunpot, New Mexico, ha mostrato in passato (Altrock, *Solar Phys*. **216**, 343, 2003) che esiste una sorta di "messaggero" che preannuncia l'approssimarsi di un massimo solare. Altrock ha infatti mostrato, per i cicli 21 22 e 23, che il cosiddetto *Rush to the Poles*, cioè il progressivo spostamento verso i poli delle protuberanze coronali con associate emissioni di massa, raggiunge una latitudine critica, compresa tra 74° e 78° in entrambi gli emisferi della stella, praticamente nello stesso periodo in cui questa presenta il massimo di attività. Le osservazioni di questi fenomeni sono state compiute da Altrock studiando l'emissione coronale nella riga del Fe XIV a 530.3 nm, in una zona della corona centrata a 1.15 raggi solari. Solo due parole per spiegare cosa si intende per riga:

è un termine derivato dalla spettroscopia, branca della fisica che analizza le frequenze della luce (spettro) emesse da atomi e molecole e dovute all'assorbimento e/o all'emissione di energia da parte loro. Con "riga" si intende una certa radiazione monocromatica, cioè di frequenza fissa, prodotta da un elemento o da una molecola. Nel plasma coronale del Sole sono presenti, con diversi livelli di ionizzazione, numerosi elementi chimici (anche molecole, ma questo discorso ci porterebbe fuori tema). Tra questi anche atomi di ferro che, soprattutto per effetto dell'elevata temperatura, hanno perso molti dei loro elettroni rispetto allo stato di neutralità elettrica. Sono quindi degli ioni positivi. Il ferro (ma anche gli altri elementi) è quindi presente nel plasma coronale con diverse specie ioniche, ciascuna delle quali produce uno spettro di frequenze caratteristico. In particolare Altrock ha osservato l'emissione di una certa frequenza (una riga corrispondente ad una lunghezza d'onda di 530.3 nm: il nanometro, o nm, è pari ad un miliardesimo di metro) emessa da atomi di ferro ionizzati 14 volte, detti Fe XIV.

Lo studio di Altrock e quelli di altri ricercatori che lo hanno seguito, ha mostrato che non solo il *Rush to the Poles* annuncia l'arrivo di un massimo solare, ma che questo viene per così dire annunciato anche dal fatto che il numero di regioni attive osservate nella riga del Fe XIV supera il valore di 0.19 (mediato su 365 giorni e in entrambi gli emisferi) a latitudini comprese tra 18.3° e 21.7°. Applicando queste conclusioni all'attuale ciclo 24, in un suo recente lavoro ancora in fase di pubblicazione, Altrock ha notato un *Rush* intermittente che è stato possibile osservare bene solo nell'emisfero Nord del Sole. Nel 2009 è stata misurata una velocità (il termine è un po' improprio, ma rende l'idea) di 4.6° in latitudine per anno di avvicinamento alla zona critica. Se comparata con il valore di circa 9.4° per anno dei cicli precedenti questo dato non fa che aggiungersi a quelli che mostrano la debolezza di questo ciclo. Però nel 2010 la velocità è cresciuta fino a 7.5° anno: questo salto da 4.6 a 7.5 in un anno è un aumento relativo mai osservato in precedenza, come se il ciclo 24 improvvisamente si fosse svegliato di colpo, senza seguire l'andamento regolare dei suoi immediati predecessori.. Estrapolando questo valore fino al raggiungimento della zona critica intorno ai 76° Altrock ha ipotizzato che il Sole abbia già presentato un massimo di attività in un periodo compreso tra Marzo e Settembre del 2011. Ma questo solo per quanto riguarda l'emisfero Nord. In quello Sud il *Rush*, se esiste, è al momento molto poco definito. Applicando i dati degli scorsi cicli Altrock ha comunque stimato che intorno al mese di Febbraio 2014 un secondo massimo, questa volta nell'emisfero Sud, potrebbe seguire quello ipoteticamente già avvenuto a Nord nel 2011.

Certo che ora lo scherzo del Sole si fa pesantuccio: tutti pensavano che avrebbe presentato, dopo l'eccezionale minimo prolungato iniziale, il massimo del ciclo 24 con un paio d'anni di ritardo, grossomodo verso la seconda metà del 2013 ed ecco che lui prende tutti in contropiede, anticipa di un anno il massimo rispetto al 2012 (calcolato come 2001 + 11), lo fa solo in un emisfero e promette di regalarcene un altro dalla parte opposta con diversi mesi di ritardo rispetto ai modelli previsionali iniziali, quelli della figura 1.

Premesso che in molti cicli (quasi tutti quelli ben studiati) la stella ha sempre presentato due massimi (uno detto principale e l'altro secondario), sfasati di diversi mesi nei due emisferi, quindi almeno in questo caso il ciclo 24 non sarebbe un'eccezione, sorge comunque spontanea una bella domanda: ma Altrock ci avrà visto giusto? Le figure 2 e 3 nelle pagine seguenti mostrano due disegni della fotosfera eseguiti dall'autore presso l'Osservatorio Solare dell'ISIS "Valceresio" di Bisuschio, in provincia di Varese, uno fatto il 21 Ottobre del 2011 e l'altro esattamente un anno dopo.

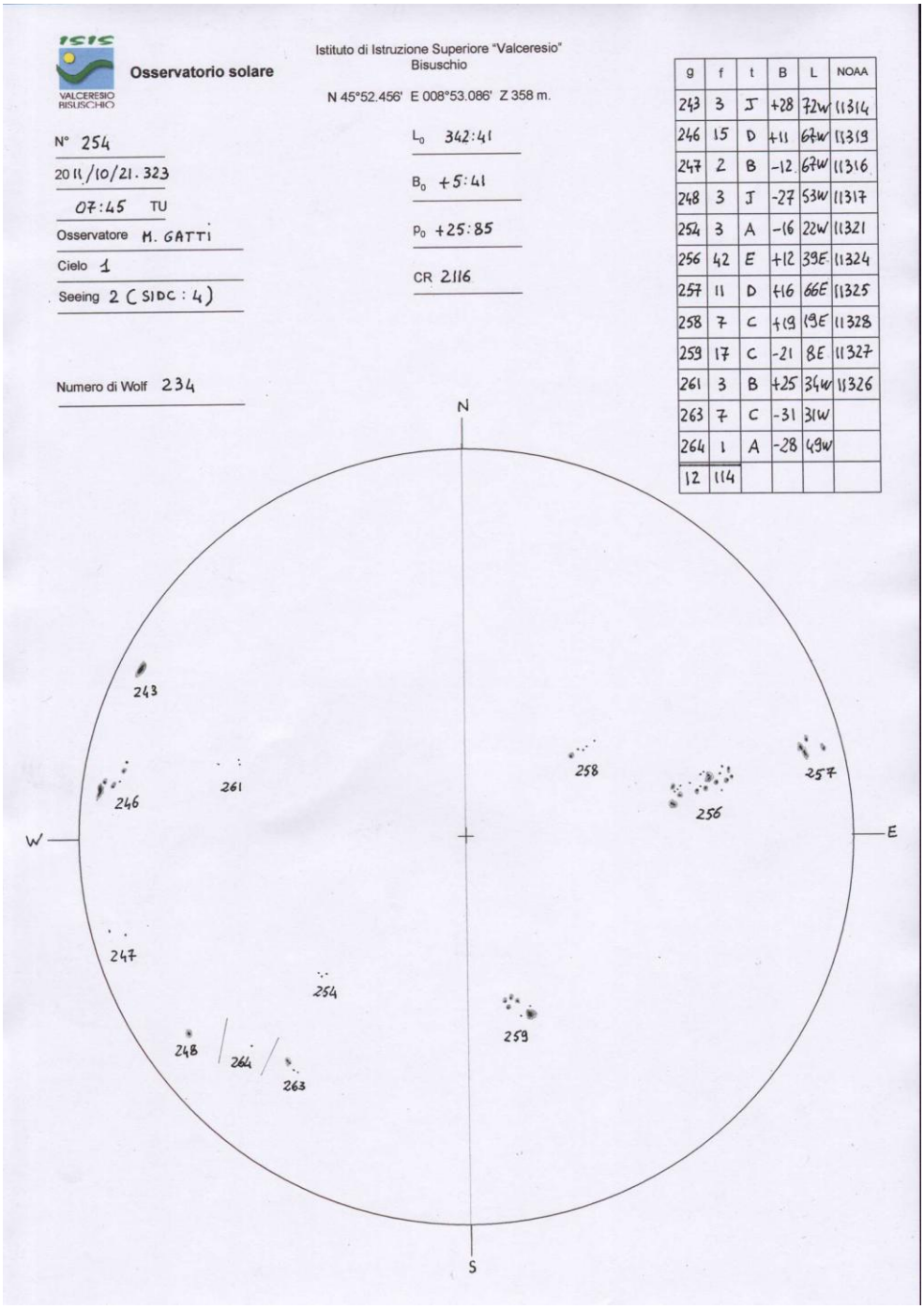


Figura 2. Disegno della fotosfera, con gruppi e macchie, eseguito dall'autore il 21/10/2011. E' stata scelta questa data in quanto quel giorno, almeno per quanto riguarda le osservazioni compiute nell'osservatorio dove l'autore lavora, è stato raggiunto il valore massimo per il numero di Wolf grezzo nel ciclo 24, valore a tutt'oggi ancora non superato. La data si colloca pochi giorni al di fuori dell'intervallo temporale indicato da Altrock come quello possibile per l'ipotetico massimo emisferico anticipato del 2011 (Marzo-Settembre, si veda il testo). Un margine di incertezza del tutto accettabile, di 21 giorni su sei mesi. Inoltre, come detto nel testo, non è il singolo dato osservativo ad essere significativo, ma la tendenza (in questo caso mensile) su tempi più lunghi. Poichè l'autore utilizza il metodo di conteggio che attribuisce un "peso" maggiore alle macchie con penombra o a quelle più marcate (specialmente in prossimità dei bordi del disco solare), il numero di macchie disegnate può non corrispondere con quelle conteggiate. Lo stesso metodo viene impiegato alla Specola Solare di Locarno ed è la continuazione di quello introdotto dai successori di Wolf.

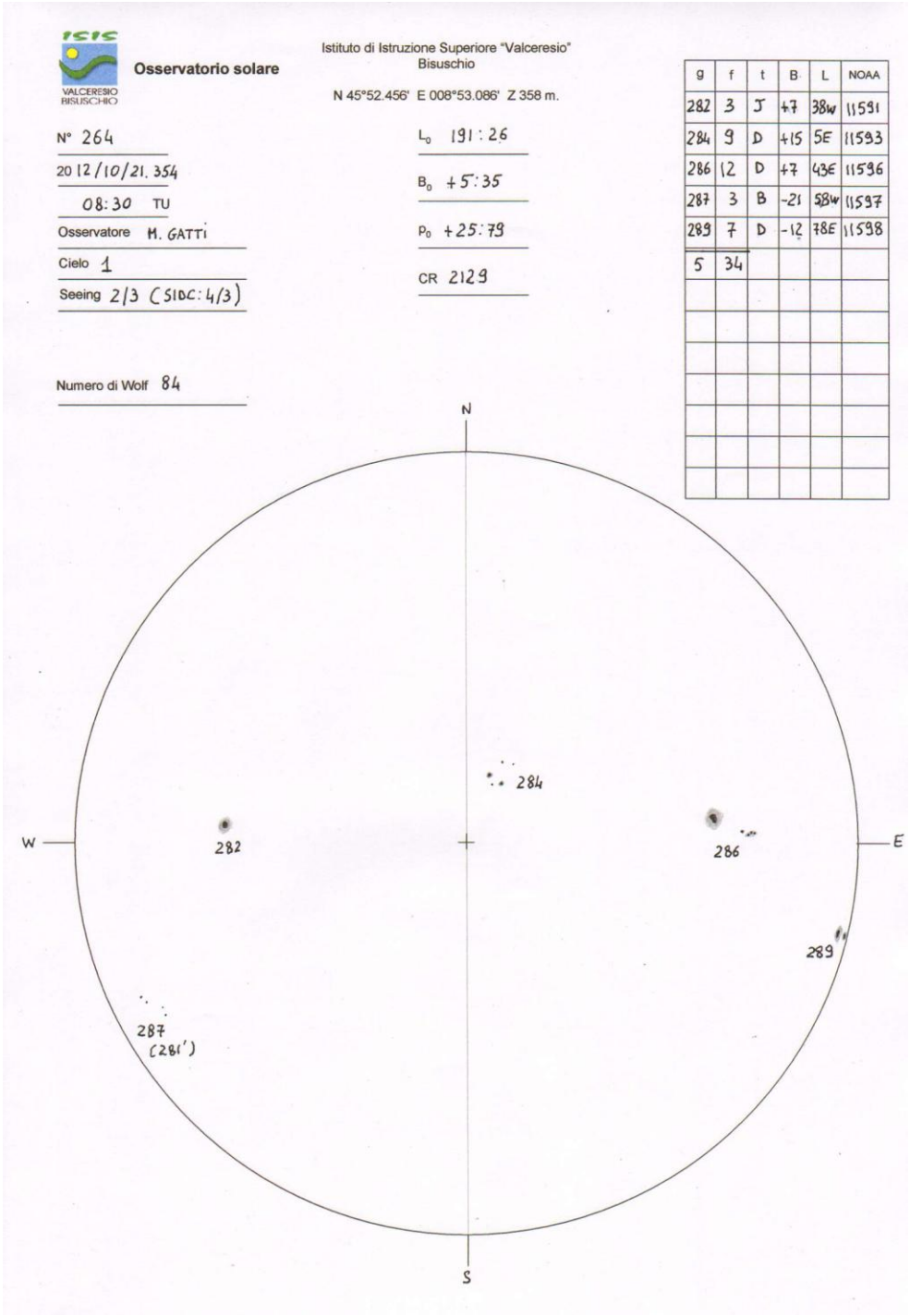


Figura 3. Un altro disegno eseguito dall'autore esattamente un anno dopo quello della figura 2, debitamente commentato nel testo e confrontato con quello dell'anno precedente.

Quello che balza subito all'occhio è l'enorme differenza nei numeri di Wolf grezzi: 234 contro 84. Se il Sole avesse dovuto raggiungere un massimo nel 2013 le cose avrebbero dovuto andare quanto meno al contrario. Nel disegno del 2011 si nota che, pur essendo presenti lo stesso numero di gruppi (sei) nei due emisferi, il numero di macchie è però prevalente nell'emisfero Nord: 81 contro 33, il che porta ad un numero di Wolf emisferico Nord (Rn) di 141 ed uno emisferico Sud (Rs) di 93, con un rapporto Rn/Rs di 1.23. Un anno dopo ci ritroviamo solo tre gruppi a Nord e due a Sud, con 24 macchie per i primi e 10 per i secondi. E' vero che c'è ancora una certa prevalenza del Nord, però i

valori sono estremamente più bassi: 54 per Rn e 30 per Rs, quindi i due sono più "vicini" tra loro. Per di più i tre gruppi a Nord si trovano a latitudini molto prossime all'equatore (tra i 7° e i 15°), comportamento tipico da Sole in fase post-massimo mentre almeno un gruppo dell'emisfero opposto scende sotto i 20°, quindi ad una latitudine più regolare per un gruppo in una fase ascendente dell'attività.

Pertanto qualcosa sembrerebbe emergere in favore dell'idea di Altrock. Però, c'è un però: l'osservazione relativa ad un giorno non ha alcun significato. Un giorno vuol dire circa 1/4000 di un ciclo ideale di 11 anni, cioè nulla. Per dare credito, o per smontare, un'ipotesi relativa al Sole occorrono dati di anni, non di giorni e nemmeno di mesi. Fortunatamente chi scrive qui sta seguendo giorno per giorno l'andamento dell'attività solare di questo interessantissimo ciclo e, analizzando i dati completi del triennio 2010-2102 (2008 e 2009 non fanno testo, perché in quegli anni il ciclo era in fase di gestazione prolungata), relativi non solo alle macchie ma anche ai flare di potenza medio-alta, si può tentare non dico di confermare (perché non ne sarei in grado) ma quanto meno di avvallare l'ipotesi di Altrock alla luce dei semplici dati numerici. I risultati di questo lavoro, attualmente ancora in corso, verranno presentati in uno dei prossimi numeri di Meridiana. Pertanto abbiate pazienza qualche mese e saprete se, come direbbe Sherlock Holmes, un indizio non fa una prova, ma due fanno l'assassino. Salvo essere poi smentiti dall'ennesimo scherzo della nostra stella burlona.

L’ipotesi di Altrock

Metà per uno non fa male a nessuno. Anche per il Sole?

di **Mario Gatti**

Osservatorio Solare
Istituto di Istruzione Superiore “Valceresio” – Via Roma 57, 21050 Bisuschio (Varese)

Nel precedente numero di Meridiana, nell’articolo “Gli scherzi del Sole” è stata presentata un’ipotesi, avanzata da Richard C. Altrock, secondo la quale nel 2011, in un intervallo temporale di 6 mesi centrato nel mese di Giugno, il Sole avrebbe presentato un massimo di attività (in anticipo sui tempi previsti dai modelli previsionali del ciclo solare 24 in corso) con spiccate caratteristiche emisferiche dovute all’emisfero Nord. Altrock conclude il suo lavoro ipotizzando che un secondo massimo emisferico, questa volta nell’emisfero Sud, potrebbe presentarsi intorno al mese di Febbraio del 2014. Per chi non avesse letto “Gli scherzi del Sole” riassumiamo qui rapidamente su cosa si basa l’ipotesi di Altrock, E’ il risultato dello studio della deriva in latitudine, da quelle più basse equatoriali a quelle più vicine ai poli, delle emissioni coronali osservate alla lunghezza d’onda a 530.3 nanometri, radiazione emessa dagli ioni Fe XIV (quindi atomi di ferro con elevato grado di ionizzazione) presenti in una zona della corona centrata a 1.15 raggi solari. Questo fenomeno, detto “*Rush to the Poles*”, è una sorta di indicatore anticipato della salita del Sole verso un massimo perché, come è stato confermato dalle osservazioni relative ai cicli 21, 22 e 23, quando le protuberanze coronali raggiungono una latitudine critica, compresa tra i 74° e i 78°, di fatto il Sole si trova durante la fase di massimo. Estrapolando alcune caratteristiche del ciclo 24 relative all’osservazione della riga del Fe XIV Altrock ha ipotizzato che nel solo emisfero Nord il Rush to the Poles sia realmente avvenuto nel periodo indicato prima, mentre è stato molto meno evidente in quello Sud. Un massimo emisferico quindi, che spiazza tutte le previsioni relative al ciclo 24 , che lo vedevano come un ciclo debole (anche se inizialmente si pensava che sarebbe stato molto forte), con un massimo spostato in avanti rispetto a quello teorico del 2012 (11 anni dopo quello del ciclo 23 nel 2001) fino almeno a Maggio 2013 se non oltre, vista la durata eccezionale del minimo a cavallo dei due cicli, prolungatosi per quasi due anni di troppo. E invece forse no, le cose non sono andate e non stanno andando così. Massimo arrivato prima e solo grazie alla “metà Nord” della stella. E poi aspettiamo quell’altro che potrebbe esserci regalato dalla “metà Sud”. Tutto questo se l’ipotesi di Altrock si rivelasse fondata. Il presente lavoro, che analizza dei semplici dati numerici relativi all’attività fotosferica (macchie solari) e agli eventi energetici (flare di potenza medio-alta) nel triennio 2010-2012 non si pone l’obiettivo di dare al quesito una risposta completa in senso positivo o negativo, ma quanto meno rappresenta un tentativo di mostrare dei risultati che potrebbero avvallare o meno l’ipotesi di Altrock.

Per prima cosa va detto che il fatto che il Sole presenti due (o a volte anche più di due) massimi durante un ciclo è cosa praticamente normale, quindi non siamo in presenza di una delle tante anomalie dello strano ciclo 24. Nella figura 1 che segue viene mostrato il cosiddetto diagramma di Maunder, o diagramma a farfalla, che è la visualizzazione della Legge di Spörer, secondo la quale le macchie solari si presentano all’inizio di un ciclo a latitudini elevate in entrambi gli emisferi, poi con il procedere del ciclo “migrano” progressivamente verso quelle più basse per posizionarsi praticamente molto vicine all’equatore al raggiungimento del minimo successivo. La presenza di nuove macchie ad alte latitudini, con certe caratteristiche magnetiche opposte rispetto alle altre in un certo emisfero è il segnale dell’inizio di un nuovo ciclo. Dalla figura si vede chiaramente che non solo la legge di Spörer vale effettivamente in entrambi gli emisferi, ma che il massimo dell’attività non si presenta contemporaneamente a Nord e a Sud: infatti questi contribuiscono a

dare due massimi separati da un certo intervallo di tempo, come evidenziato dai rettangolini verticali che segnano il momento in cui un certo emisfero ha raggiunto il massimo.

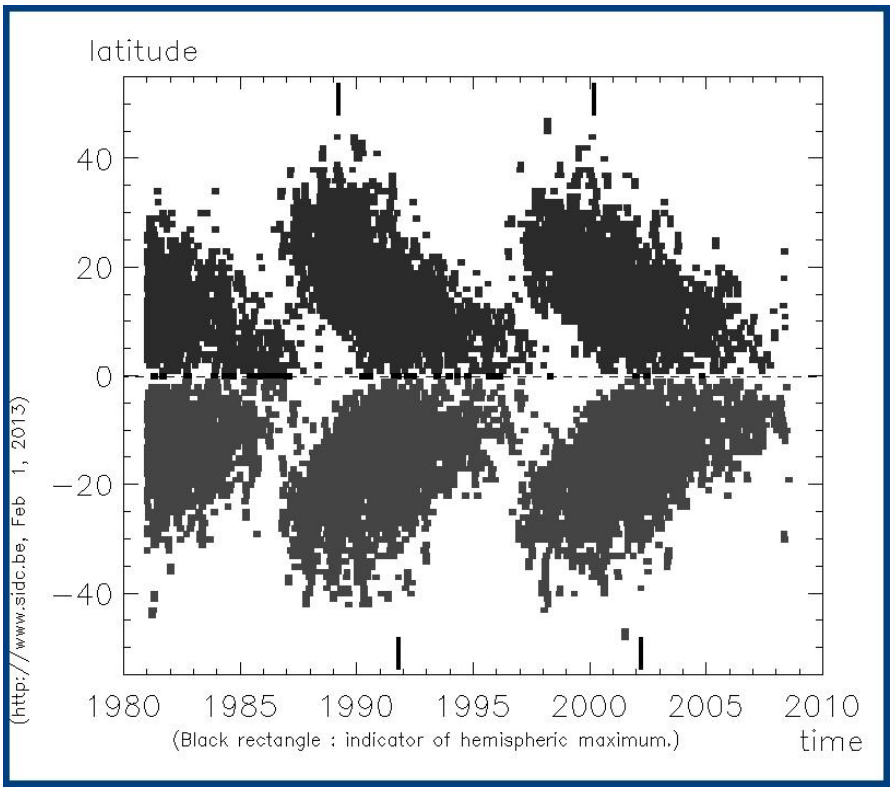


Figura 1

Diagramma di Maunder, detto anche a farfalla, dal quale si deduce come in entrambi gli emisferi le macchie tendano a migrare verso latitudini sempre più basse con il procedere di un ciclo solare. Sull'asse verticale sono riportate le latitudini, positive per l'emisfero Nord e negative per quello Sud, sull'asse orizzontale il tempo in anni. I piccoli tratti verticali segnano il momento dei massimi nei due emisferi, che come si nota per gli ultimi due cicli (il 22 e il 23) sono sfasati nel tempo.

Cortesia: SIDC, Bruxelles, http://sidc.be

Lo studio dell'esistenza di uno o più massimi non è cosa poi recentissima: già nel 1963 M.N. Gnevyshev (*The Corona and the 11-Year Cycle of Solar Activity, Soviet Astronomy-AJ 7(3), 311-318, 1963*) studiando l'evoluzione dell'intensità dell'emissione coronale della riga a 530.3 nanometri in differenti bande latitudinali durante il ciclo solare 19, trovò che ci furono effettivamente due massimi di attività: il primo, durante il quale l'intensità coronale aumentò e poi successivamente cominciò a diminuire a tutte le latitudini osservate apparve nel 1957, il secondo massimo si presentò nel 1959-60 e fu osservato solo a basse latitudini, ma al di sotto dei 15° fu anche più forte del primo. In seguito Antalova e Gnevyshev (*Principal Characteristics of the 11-Year Solar Activity Cycle. Astronomicheskii Zhurnal 42, 253-258, 1965*) indagarono sul fatto che quella potesse essere, o non essere, una caratteristica del solo ciclo 19 piuttosto che di tutti i cicli. Sovrapponendo le curve riportanti i numeri di macchie solari di tutti i cicli tra il 1874 e il 1962 trovarono lo stesso risultato per tutti i cicli: la presenza di due massimi nel numero di macchie, il primo osservabile a tutte le latitudini e il secondo osservabile solo a basse latitudini. L'ampiezza relativa dei due picchi e l'intervallo di tempo che li separa varia da un ciclo all'altro e quando questo intervallo di tempo è piccolo sono visti come un unico picco a medie latitudini, mentre nel caso opposto, quando si notano nettamente due picchi distinti, la loro separazione in termini temporali diventa evidente ed è nota come il "*Gnevyshev Gap*" (figura 2).

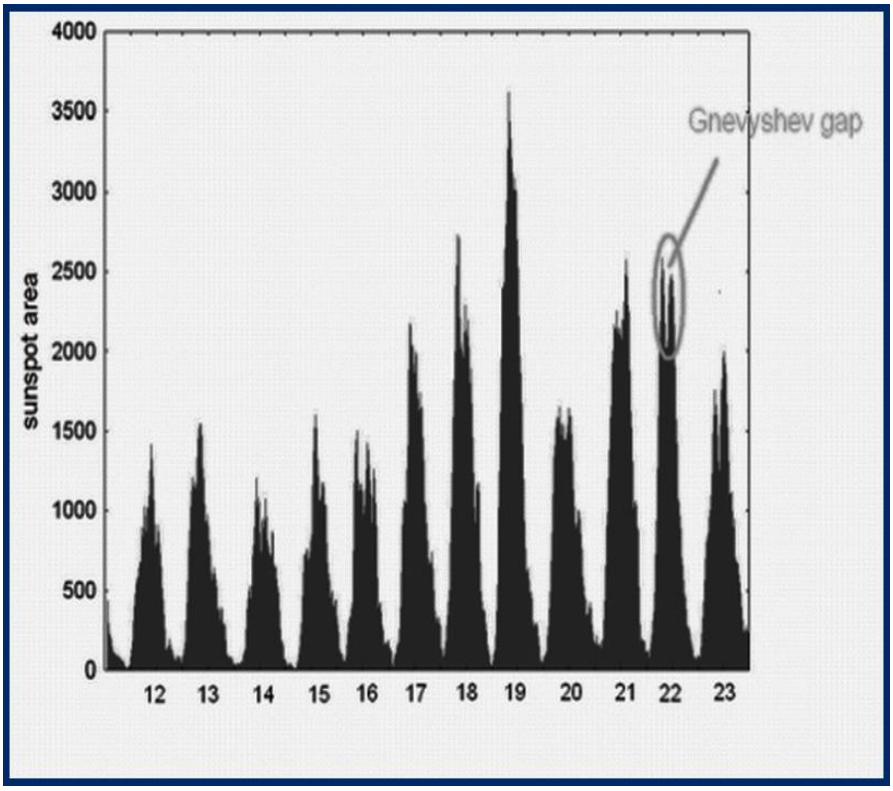


Figura 2

Grafico che riporta l'area delle macchie solari (misurata in Mesv o milionesimi di emisfero solare visibile) in funzione del tempo per i cicli dal numero 11 (relativamente alla sola seconda metà, dal massimo in poi) fino al 23. Molti cicli presentano più picchi di massimo relativo. In certi casi questi sono molto vicini nel tempo e non si riesce a risolverli visualmente, ma quando sono ben separati, come nel caso del ciclo 22 evidenziato in figura, l'intervallo tra i due picchi è il cosiddetto "Gnevyshev Gap".

Cortesia: K.Georgieva, articolo citato nel testo.

Studi successivi sembrano non confermare appieno l'esistenza del Gnevyshev Gap in tutti i cicli. Ad esempio Norton e Gallagher (*Solar-Cycle Characteristics Examined in Separate Hemispheres: Phase, Gnevyshev Gap and Lenght of Minimum. Solar Physics 261 (1), 193-207, 2010*) rilevarono la presenza di picchi separati solo in 8 di 12 cicli presi in considerazione. Però in un lavoro molto recente (*Why the Sunspot Cycle is Doubled Piked*) K. Georgieva, dello Space and Solar-Terrestrial Research Institute-Bulgarian Academy of Sciences di Sofia, in Bulgaria, sembra aver messo la parola fine sulla questione. Basandosi sulla teoria della dinamo solare sviluppata da E. Parker nel 1955 (*Hydromagnetic dynamo models. Astrophysical Journal 122, 293-314, 1955*) e sul cosiddetto meccanismo della dinamo a trasporto di flusso, definito inizialmente da Babcock nel 1961 (*The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-year Cycle, The Astrophysical Journal 133, 572-587, 1961*), sviluppato poi matematicamente da Leighton nel 1969 (*Magneto-Kinematic Model of the Solar Cycle. The Astrophysical Journal 156, 1-26, 1969),* e per questo noto anche come Modello di Babcock-Leighton, Georgieva ha chiaramente mostrato che l'esistenza di un doppio picco nel numero di macchie solari e l'esistenza del Gnevyshev Gap trovano la loro naturale spiegazione applicando le teorie sopracitate relativamente alla zona di convezione e alla Tacochline, lo strato che separa la zona convettiva da quella radiativa all'interno del Sole.

Quanto detto fin qui richiede conoscenze molto specifiche di fisica solare che vanno ben al di là dello scopo di questo articolo e del carattere divulgativo di questa rivista, per cui restiamo come si

suole dire con i piedi per terra e vediamo come, una volta data per buona l'idea che i cicli solari presentino dei massimi "sdoppiati", si possa trovare qualche risultato utile per accettare anche l'ipotesi di Altrock relativa al ciclo in corso. Nell' Osservatorio dove lavoro, quello dell'Istituto di Istruzione Superiore "Valceresio" di Bisuschio, in provincia di Varese, il ciclo 24 è regolarmente osservato dal suo inizio, inoltre giornalmente viene monitorata l'attività solare grazie ai dati inviati a Terra dalle sonde spaziali orbitanti relativi al flusso di Raggi X nella banda tra 1Å e 8 Å, ai flussi di protoni ed elettroni di specifiche energie, alla velocità, temperatura e densità del vento solare eccetera.

Al nostro scopo interessano gli International Sunspot Numbers (ISN), ossia i numeri di Wolf normalizzati pubblicati trimestralmente dal SIDC di Bruxelles ed il conteggio dei flare di potenza medio - alta (cioè quelli di classe M e X) relativi al triennio 2010-2012. E' vero che ufficialmente il ciclo 24 è iniziato nel Gennaio del 2008, ma di fatto fino a metà del 2010 l'attività solare è stata piuttosto scarsa, per non dire quasi inesistente, quindi i dati relativi al 2008 e al 2009 non sono stati considerati semplicemente perché inutili. A titolo di esempio, basti dire che dei 287 giorni in cui nel2009 nel nostro Osservatorio è stato guardato il Sole, solo 84 di questi ci hanno mostrato un Sole con delle macchie, peraltro poche e in gruppi piccoli. Invece a partire dalla metà del 2010 qualcosa ha iniziato a muoversi.

Albert Einstein amava dire che un grafico vale dieci milioni di parole, per cui facciamo parlare le immagini, ottenute con un paziente lavoro di sintesi sui dati del periodo indicato. Per quanto riguarda i numeri di Wolf, ovviamente non avrebbe senso presentare quelli relativi alle mie osservazioni (peraltro abbastanza numerose, 279 nel 2010, 311 nel 2011 e 315 nel 2012), proprio per il fatto che sono relativi a chi queste osservazioni le ha compiute. Utilizziamo invece gli ISN, che sono ottenuti tenendo conto di tutti i dati inviati al SIDC dal network di Osservatori che gli fa capo e quindi sono "ripuliti" da tutti i fattori legati ai singoli osservatori. I dati relativi alla seconda metà del 2012 sono ancora quelli provvisori, ma di solito questi si discostano da quelli definitivi solo per qualche leggera differenza nella prima (e unica) cifra decimale.

In figura 3 è riportato un istogramma relativo ai Numeri di Wolf normalizzati per il 2010, separati tra emisfero Nord e Sud. Le barre nere sono relative a quello Nord, le barre grigie al Sud:

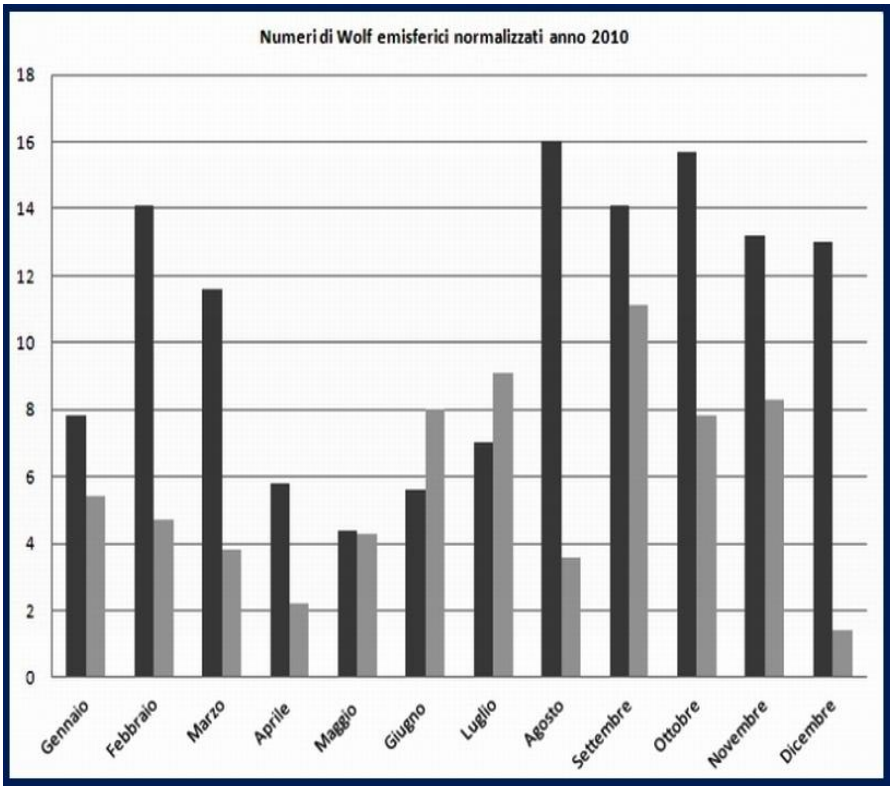


Figura 3

Istogramma a barre nel quale sono riportati gli ISN (International Sunspot Numbers) emisferici con cadenza mensile per il 2010. Le barre nere più scure sono relative all'emisfero Nord, quelle grigie più chiare all'emisfero Sud.

Immagine elaborata da M. Gatti in base ai dati del SIDC - News numeri 1,2,3,4 del 2010.

L'immagine mostra chiaramente che, se pur debole, l'attività fotosferica è più marcata nell'emisfero Nord, in particolare nei mesi di Agosto e Dicembre. La media di valori dell'intero anno per il Nord è 10.7 contro il 5.8 relativo all'emisfero Sud. Sono valori piccoli, ma la tendenza comincia a delinearsi.

Veniamo al 2011, i cui dati sono mostrati in figura 4 alla pagina seguente. Qui le cose sono tanto chiare al punto che non meritano nemmeno molti commenti. E' evidente la schiacciante superiorità dell'emisfero Nord, culminata in Novembre con un 66.1 contro il 30.6 dell'emisfero Sud. La media annuale del Nord è di 38.3, quella del Sud di 17.3. Da notare inoltre come le differenze siano marcate nel periodo Marzo-Settembre, centrato nel mese di Giugno indicato da Altrock come quello del massimo emisferico. Però attenzione: lui non ha usato i numeri di Wolf, ma si è basato sul Rush to the Poles, quindi non vi meravigliate del fatto che il valore più alto degli ISN del 2011 cada in Novembre, che è fuori dall'intervallo, ma di poco (nel nostro Osservatorio il valore maggiore del numero di Wolf relativo, 234, è stato comunque registrato il 21 Ottobre). In altri termini, ci stiamo riferendo a osservazioni fatte in due diverse parti della stella: gli ISN sono un indice dell'attività fotosferica, mentre le misure di Altrock derivano da quella coronale. E' vero che le due non sono certo disgiunte, ma che non siano sincronizzate al minuto è cosa altrettanto accertata. Al di là di questo leggero sfasamento temporale, l'attività fotosferica e quella rilevata da Altrock nella riga del Fe XIV possono essere quindi con ragionevole certezza considerate coincidenti, confermando una prevalenza dell'emisfero Nord su quello Sud per tutto l'anno 2011, non solo nel periodo Marzo-Settembre. Ci interesseremo comunque anche noi, più avanti, dell'attività coronale, se pur in un range ristretto di lunghezze d'onda diverso dalla riga monocromatica di cui si è occupato Altrock.

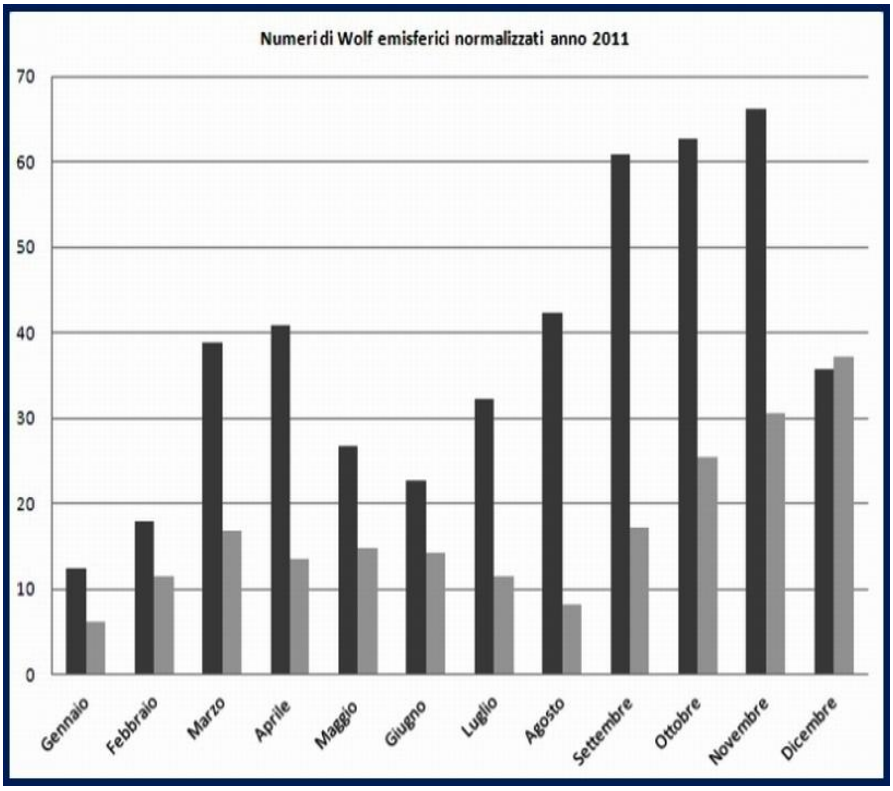


Figura 4

Come per la figura 3, relativamente al 2011, con la stessa convenzione sui colori delle barre. Immagine elaborata da M. Gatti in base ai dati del SIDC - News numeri 1,2,3,4 del 2011.

Pertanto, alla luce dei dati analizzati fin qui e relativi alla fotosfera, è fuor di dubbio che nel 2011 il Sole sia stato molto più attivo che nell'anno precedente, almeno per quanto riguarda le macchie solari, ma per decidere se sia passato o meno da un massimo (che se c'è stato è stato sicuramente emisferico a Nord, questo è palese) bisogna buttare lo sguardo in avanti. E quindi passiamo all'istogramma della figura 5, relativa al 2012 (didascalia alla pagina seguente):

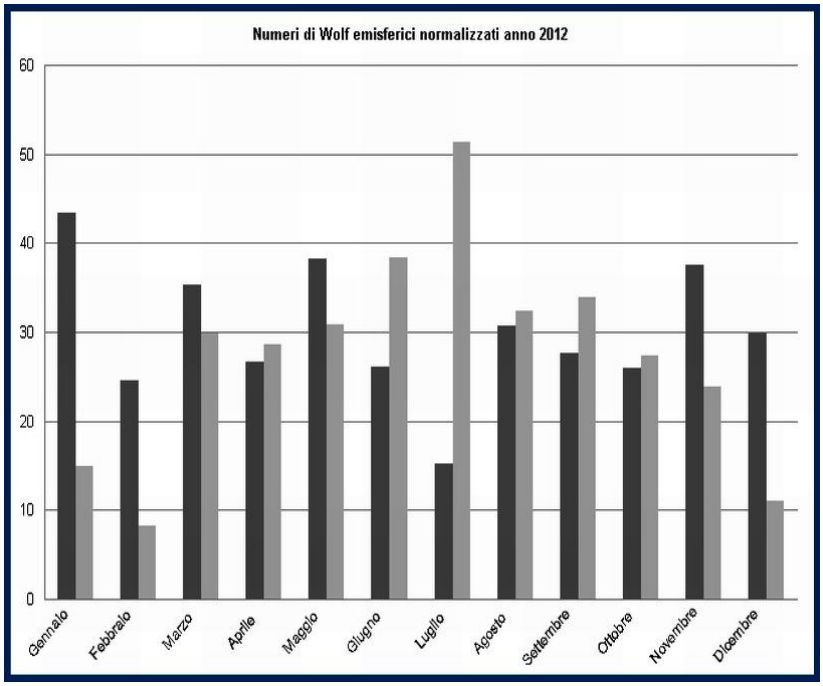


Figura 5

Come per le precedenti figure 3 e 4, ma relativamente al 2012.

Immagine elaborata da M. Gatti in base ai dati del SIDC - News numeri 1 e 2 del 2012 ed ai Sunspot Monthly Bullettins sempre editi dal SIDC, numeri da 7 a 12 (valori provvisori degli ISN da Luglio a Dicembre).

Dal grafico si nota che l'emisfero Nord continua a prevalere fino a Maggio, poi la tendenza si inverte, ed in Luglio addirittura lo scarto è notevole: 51.3 per l'emisfero Sud contro 15.2 per quello Nord. Poi tra Agosto e Ottobre lo scarto Sud-Nord è sempre favorevole al primo ma si riduce e di molto, finché in Novembre e Dicembre le cose si ribaltano di nuovo. Le medie annuali sono 30.1 per il Nord e 27.6 per il Sud. Sostanzialmente un pareggio, vista la piccola differenza tra i due valori. La conclusione è che il 2012 non ci dice proprio nulla. Una cosa però va notata: l'attività fotosferica nell'anno da poco trascorso è stata di fatto sugli stessi livelli, se non addirittura lievemente inferiori, di quelli del 2011, come se il Sole si fosse … fermato. A conferma di questa affermazione riportiamo stavolta i dati del nostro Osservatorio: nel 2012 sono stati conteggiati 351 gruppi contro i 354 del 2011, quindi praticamente gli stessi, ma quello che cambia abbastanza e' il numero di macchie: 8408 nel 2012 contro le 11902 del 2011. Resta da vedere se il Sole, dopo questo apparente stallo, tenderà a diminuire ancora la sua attività o tenderà a riprenderla e a quali latitudini appariranno la maggioranza dei gruppi. Le osservazioni più recenti, quelle del 2013, hanno visto per ora una decisa ripresa nella prima metà di Gennaio, seguita però da un vistoso calo, al punto che in questi giorni (metà di Febbraio), mentre questo articolo viene scritto, sono presenti in media due - tre gruppi di macchie, e per questo primo e mese e mezzo l'attività è stata comunque maggiore ancora nell'emisfero Nord. Il Sole sta presentando una sorta di "minimo intermedio" tra i due possibili massimi emisferici o semplicemente non ci sarà un nuovo massimo ed il ciclo 24 si è avviato verso il suo minimo finale? Presto per dirlo: dovremo aspettare almeno la metà del 2013 per poter avere qualche indizio in più. Quindi, dall'elaborazione dei dati fotosferici emerge un dato di fatto: è vero che nel 2011 il Sole è stato molto più attivo nell'emisfero Nord che in quello Sud, ma che si sia trattato di un massimo e che possa essercene un altro verso Febbraio 2014 non ci è ancora dato di saperlo. L'ipotesi di Altrock resta quindi tale, solo un' ipotesi appunto.

Ma sul Sole non ci sono solo le macchie. Gli ISN sono sicuramente un indice della maggiore o minore attività solare in generale tanto che sono usati quasi sempre come parametri di riferimento in moltissimi studi di fisica solare, ma il Sole non finisce con la fotosfera e soprattutto non si limita a fabbricare macchie. Andiamo perciò a vedere cosa è successo dal 2010 al 2012 sulla corona, analizzando i conteggi dei flare di classe M e X (quelli più "energetici"). Nelle figure che seguono sono riportati appunto questi eventi, con cadenza mensile, per i tre anni del periodo e per ciascuna classe di potenza. Come nel caso degli ISN, negli istogrammi le barre nere sono riferite all'emisfero Nord, quelle grigie all'emisfero Sud, salvo dove diversamente indicato. I dati sono stati ricavati dalle misure inviate a Terra dal satellite GOES-15 SXI in una ristretta banda di frequenza, tra 1Å e 8 Å nel dominio dei Raggi X duri e rielaborati nel nostro Osservatorio. Cominciamo con i flare di classe M del 2010 (figura 6 alla pagina seguente):

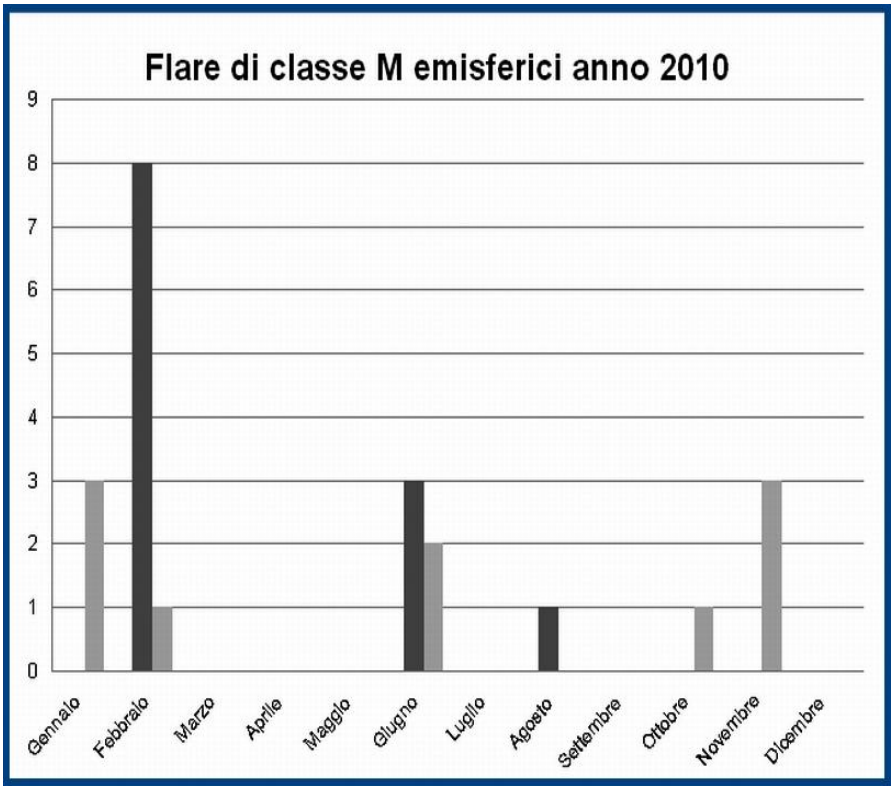


Figura 6

Conteggio dei flare di classe M suddivisi nei due emisferi per il 2010. Barre nere per il Nord e grigie per il Sud.

Immagine elaborata da M. Gatti utilizzando i dati di GOES 15 SXI nella banda di lunghezza d'onda nei raggi X duri indicata nel testo.

Anche qui poca roba: il flare più intenso è stato un M8.3 emesso il 6 Febbraio dalla Regione Attiva NOAA 11045, ma la partita tra Nord e Sud si chiude in perfetta parità: 12 flare per ciascuno.

Nel 2010 non ci sono stati flare di classe X, quindi passiamo all'anno successivo, cominciando dalla classe M in figura 7 alla pagina seguente: come nel caso delle macchie, anche qui le cose cambiano drasticamente: 71 flare a Nord contro 32 a Sud. Inoltre nell'intervallo di Altrock se ne sono verificati 48 a Nord contro 16 a Sud. Il triplo. Pertanto per i flare di classe M l'attività energetica del Sole è stata decisamente più intensa nell'emisfero Nord e proprio nell'intervallo considerato da Altrock, con picco all'estremità destra, il mese di Settembre. Il flare più intenso, un M9.3, è stato emesso il 4 Agosto dalla Regione Attiva NOAA 11261. Notate come riportando dati relativi alla corona, la stessa parte della stella dove ha osservato Altrock (anche se la riga del Fe XIV non è nei Raggi X e lui non conteggiava flare), sembra che i conti tornino in suo favore.

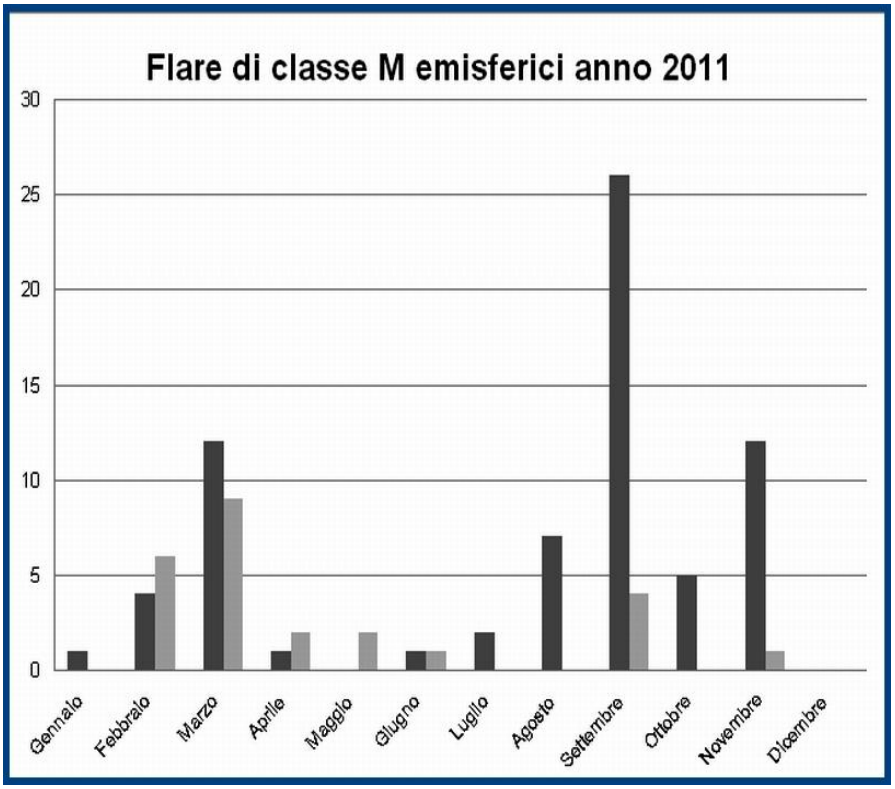


Figura 7: *Come per la figura 6, ma relativamente all'anno 2011*. Immagine elaborata da M. Gatti utilizzando i dati di GOES 15 SXI nella banda di lunghezza d'onda nei raggi X duri indicata nel testo.

Passiamo ai flare di classe X, in figura 8, dove la convenzione dei colori è invertita: grigio per il Nord, nero per il Sud (didascalia alla pagina seguente):

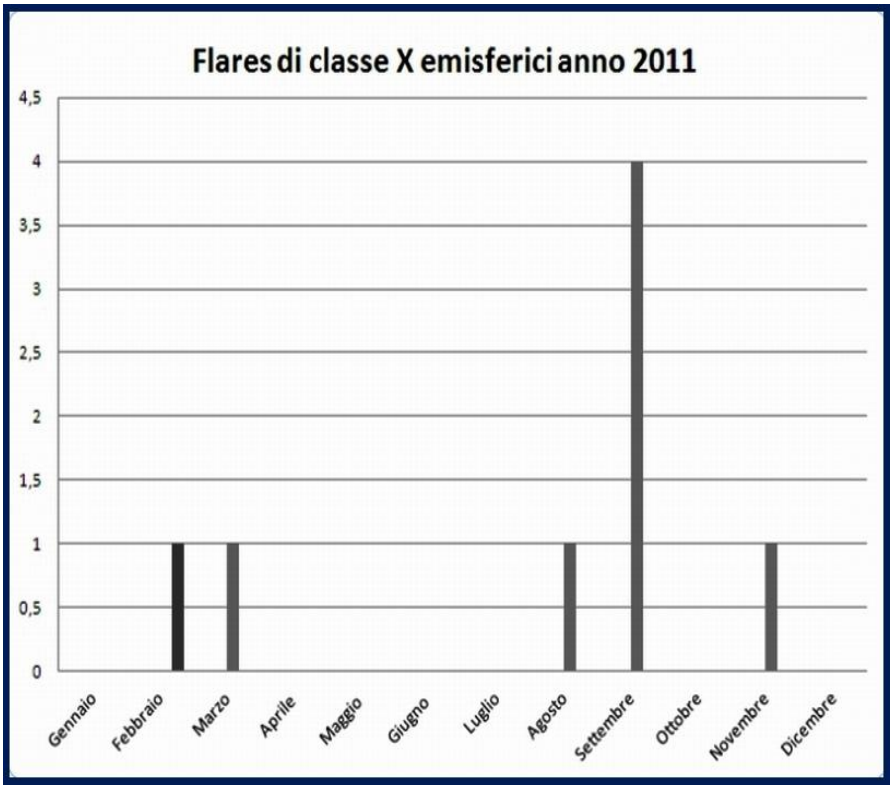


Figura 8

Conteggio dei flare di classe X emisferici per il 2011. La convenzione dei colori delle barre è invertita rispetto alle figure precedenti: grigie per l'emisfero Nord, nere per quello Sud.

Immagine elaborata da M. Gatti utilizzando i dati di GOES 15 SXI nella banda di lunghezza d'onda nei raggi X duri indicata nel testo.

In totale 7 flare a Nord e solo uno a Sud, in Febbraio. Il più intenso, un X6.9 il 9 Agosto è stato emesso dalla Regione Attiva NOAA 11263 e finora è stato il più forte flare del ciclo 24. L'evento inoltre cade all'interno dell'intervallo di Altrock, durante il quale si sono verificati 6 flare a Nord e nessuno a Sud. Le conclusioni sono le stesse fatte per la classe M: l'ipotesi sembrerebbe confermabile. Ma anche per la corona riserviamoci di vedere cosa è successo nel 2012, prima di tirare conclusioni.

La figura 9 si riferisce ai flare di classe M per il 2012 (barre nere: Nord, barre grigie: Sud):

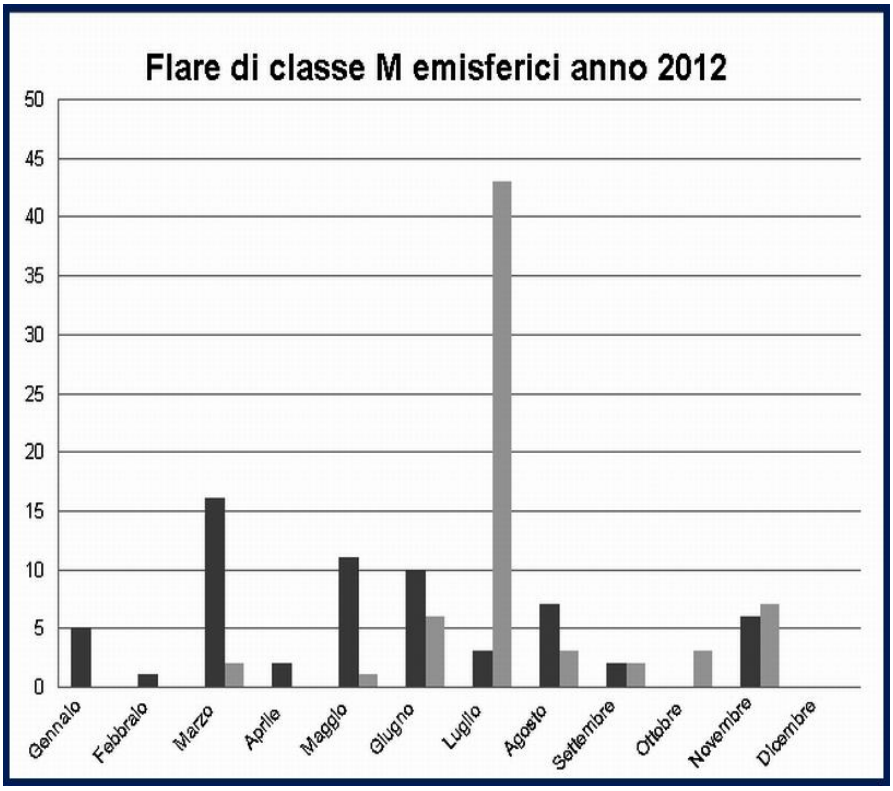


Figura 9

Conteggio mensile dei flare di classe M suddivisi per i due emisferi per l'anno 2012. Barre nere: Nord, barre grigie:Sud.

Immagine elaborata da M. Gatti utilizzando i dati di GOES 15 SXI nella banda di lunghezza d'onda nei raggi X duri indicata nel testo.

La media annuale è di 67 flare nell'emisfero Sud, contro i 63 di quello Nord. Quindi, come nel caso degli ISN un sostanziale pareggio, anche se in Luglio (ma solo in quel mese) la prevalenza del Sud è stata schiacciante: 43 contro 3. Il flare più intenso è stato un M9.0 il 20 Ottobre, emesso dalla

Regione Attiva NOAA 11598. Per finire in figura 10 andiamo a vedere cosa è successo con la classe X (barre grigie: Nord, barre nere: Sud):

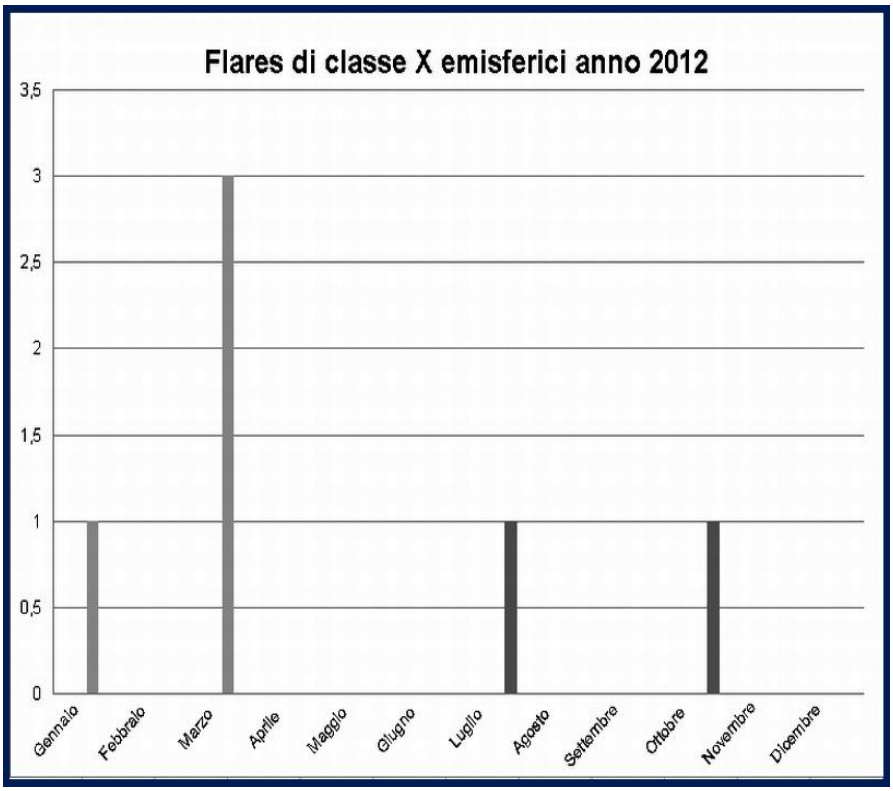


Figura 10

Come per la figura 9, ma relativamente ai flare di classe X e con la convenzione dei colori delle barre invertita: grigie per il Nord e nere per il Sud.

Immagine elaborata da M. Gatti utilizzando i dati di GOES 15 SXI nella banda di lunghezza d'onda nei raggi X duri indicata nel testo.

Prevalenza dell'emisfero Nord, con 4 flare contro i 2 del Sud, troppo pochi però per dare risultati statisticamente significativi. Flare più intenso un X5.4 emesso il 7 Marzo dalla Regione Attiva NOAA 11429, quello che ha innescato poi la famosa (forte ma non fortissima) *Women Day Storm*, la più intensa accaduta finora nel ciclo 24. Per la cronaca, questa regione si trovava nell'emisfero Nord.

Quindi anche per l'attività energetica il 2012 non ci permette di trarre conclusioni. Come fatto con gli ISN vediamo anche il primo mese e mezzo del 2013: 5 flare di classe M deboli, tutti a Nord e nessun flare di classe X. Quindi, anche se esaminando l'attività energetica in corona nella banda di frequenze indicata si trae qualche non dico certezza ma almeno qualche indizio in più a favore dell'ipotesi di Altrock rispetto all'esame degli ISN, la conclusione però non cambia: dovremo per forza attendere quello che succederà quest'anno per risolvere la questione. Una precisazione: dal conteggio dei flare negli anni presi in considerazione sono stati esclusi 14 flare di classe M in quanto non è stato possibile identificare l' emisfero di provenienza e un flare di classe X che è stato emesso nel Settembre del 2012 ma è stato un *back - side event*, cioè è stato prodotto da una regione attiva già transitata sull'emisfero non visibile del Sole in prossimità del lembo SW. Il flare, osservato dal satellite STEREO A (che osserva quasi metà della parte del Sole non visibile da Terra dal punto di vista di chi la precede sull'orbita, quindi può vedere eventi prodotti da regioni attive già

"tramontate") non è stato visibile per GOES 15, quindi non è stato nemmeno possibile rilevare la sua intensità e per questo motivo non è stato conteggiato.

Per finire, diamo uno sguardo anche ai pareri di altri che si sono occupati della faccenda dell'ipotetico massimo emisferico del 2011.

S. Sello, del Mathematical and Physicals Models Enel Research di Pisa, Italia, in un suo lavoro (*Solar Cycle 24: is the peak coming?)* passa in rassegna diversi modelli previsionali del ciclo 24 (riportati in figura 11 con le debite spiegazioni) nonché l'andamento degli ISN prodotti dal SIDC e giunge alla conclusione che effettivamente in un periodo intorno a Giugno 2011 il Sole abbia prodotto un massimo emisferico per quanto riguarda le macchie e prevede che un secondo massimo, con valore dell'ISN intorno a 75 avrebbe dovuto presentarsi nel Dicembre del 2012. Anche l'IPS, la sezione dedicata allo Space Weather dell'Australian Government Bureau of Meteorology, uno dei maggiori centri di studi solari fuori dall'Europa e dal continente americano, si era allineato sulla stessa previsione che come abbiamo però visto è stata smentita dal Sole, che nel Dicembre 2012 ha presentato dei valori degli ISN bassi, addirittura inferiori a quelli del 2011.

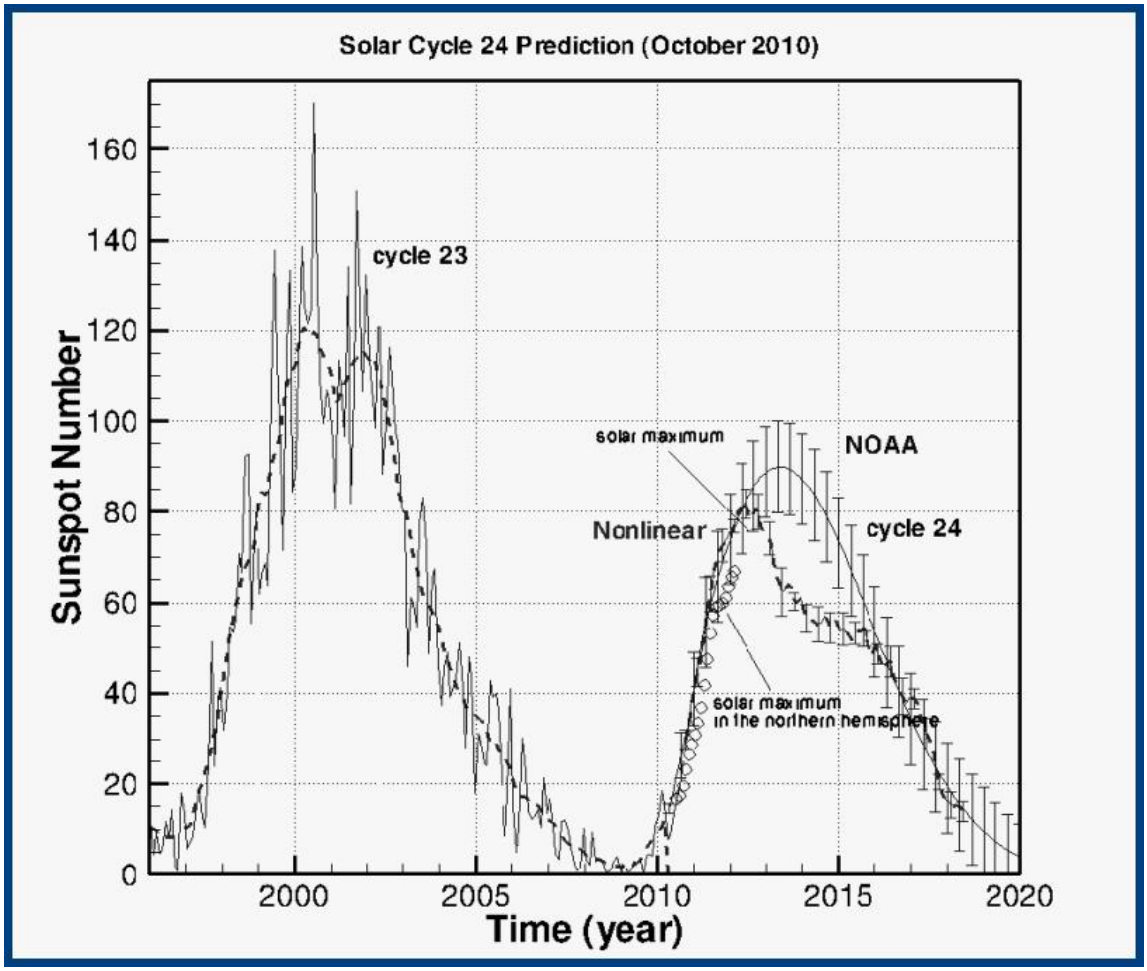


Figura 11

Diverse curve che rappresentano vari modelli previsionali per il ciclo 24. La serie dei circoletti indica la salita del Sole verso l'ipotetico massimo emisferico a Nord nel 2011. Altri modelli sono ottenuti dai dati NOAA e da altri chiamati non lineari.

Cortesia: S. Sello, articolo citato nel testo.

Altri invece vanno nella direzione opposta: L.C Uzal e collaboratori (*ArXiv:1205.3150v1, 2012*), prevedono l'arrivo del massimo del ciclo in corso per Dicembre 2013 e quindi per valutare questa ipotesi si dovranno ovviamente attendere i prossimi mesi di osservazione.

Nella newsletter pubblicata tra il 29 Ottobre e il 4 Novembre del 2012 da parte del STCE, il Belgian Solar - Terrestrial Centre of Excellence di Bruxelles viene invece avanzata una proposta per spiegare che quello del 2011 ha poche possibilità (secondo loro) di essere stato un vero massimo di attività fotosferica, per una svariata serie di ragioni di cui una particolarmente significativa: un massimo nella parte finale del 2011, quando effettivamente gli ISN sono stati i più elevati finora, significherebbe un tempo di risalita (cioè il tempo necessario in un ciclo solare per passare dal minimo al massimo) di soli 3 anni. Tempi così brevi sono stati osservati solo per cicli molto attivi e "corti", cioè di durata inferiore a quella media di 11.2 anni. Il ciclo 22, ad esempio, ha impiegato solo 37 mesi per raggiungere il suo massimo con un ISN di circa 160 nell'Ottobre del 1989. Dall'altro lato, cicli di bassa forza come il 20 nel 1969 e il 23 nel 2000 hanno impiegato oltre 4 anni per raggiungere i rispettivi massimi. Dato che il ciclo 24 non sembra essere né corto (dato il suo eccezionale minimo prolungato iniziale), né tantomeno forte, visti i valori degli ISN calcolati finora, l'idea del STCE potrebbe di fatto avere qualche fondamento. Ma chi ci dice che questa non sia l'ennesima strana sorpresa delle tante che ci ha già offerto questo anomalo ciclo? L'articolo della newsletter si conclude con l'affermazione che ragionevolmente, quando l'emisfero Sud raggiungerà il picco di attività, ci sarà un nuovo e più forte massimo, che potrebbe quindi essere il "vero massimo" del ciclo 24. A riprova di queste affermazioni il STCE porta l'esempio del ciclo 16, la cui comparazione con il ciclo 24 è presentata in figura 12 (con didascalia alla pagina seguente), come un esempio di un ciclo di bassa forza che ha presentato diversi periodi di massimo relativo, di cui due prima di quello più intenso avvenuto circa 66 mesi (quindi 5 anni e mezzo) dopo il minimo precedente con un ISN di circa 80 e un altro ancora dopo, durante la fase calante verso il minimo successivo. Un ciclo con quattro picchi: sarebbe stato interessante se Altrock avesse potuto osservarlo con la sua tecnica del Rush to the Poles, purtroppo il ciclo 16 è esistito troppo tempo fa.

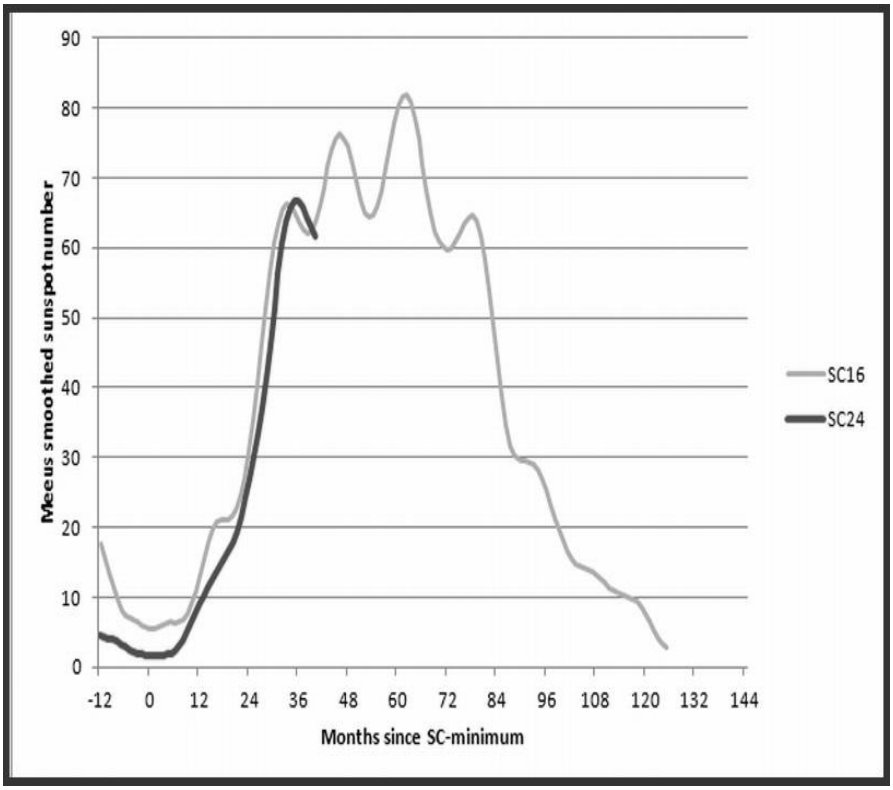


Figura 12

Sovrapposizione di cicli lunghi e deboli: il 16 (linea più chiara) e l'attuale 24 (linea più scura). Sono riportati i valori medi degli ISN in funzione dei mesi trascorsi dopo il massimo iniziale dei due cicli. Notare come il 16 abbia presentato quattro massimi, di cui uno assoluto e tre relativi e come l'andamento del ciclo 24, almeno fino a questo momento, si sovrapponga in modo quasi perfetto a quello del suo predecessore. Continuerà così?

Cortesia: Newsletter of Belgian Solar - Terrestrial Centre of Excellence (STCE), Bruxelles, Ottobre-Novembre 2012

E qui ci fermiamo anche noi. Quali conclusioni trarre alla fine di tutta questa lunga rassegna di numeri, diagrammi, previsioni e teorie? Che di certo non siamo in grado di affermare se Altrock abbia ragione o abbia torto. Ma la cosa non deve meravigliare nessuno: quando si ha a che fare con il Sole situazioni come questa sono la norma, non l'eccezione. Del resto la durata della vita umana è troppo breve non solo in rapporto a quella della stella, ma anche a quella dei suoi cicli di attività. Un osservatore solare è come un medico che può ascoltare (quando gli va bene) 5-6 battiti del cuore di un suo paziente nell'arco di tutta la sua vita (del medico). Un po' pochini per stilare una diagnosi sicura. Ma questi pochi battiti ascoltati danno comunque qualche informazione, che verrà tramandata a chi verrà dopo unitamente a quelle che altri ci hanno lasciato dal passato. E, forse, prima o poi, qualcuno potrà vederci più chiaro, anche se sarà un medico destinato di sicuro a morire prima del suo paziente. Qualcuno potrà obiettare che tutto ciò è forse inutile e anche un po' macabro, ma la grande passione che muove gli "amanti del Sole" va al di là di qualunque altra cosa. E questa e' l'unica certezza che emerge dal mare di dubbi e punti interrogativi nel quale questo articolo ha navigato fin dalla sua prima riga scritta.

Le Aurore dell'ottavo secolo

Qualcuno non ci credeva, ma la colpa è stata del Sole, come sempre.

Mario Gatti

Osservatorio Solare
Istituto di Istruzione Secondaria Superiore "Valceresio"
Via Roma 57, 21050 Bisuschio (Varese)

Gli anni tra il 770 e il 786 del secolo VIII dell'era cristiana sono stati caratterizzati da spettacolari aurore polari, forse più che in ogni altro periodo della storia dell'umanità. E noi come facciamo a saperlo? In assenza di reperti fotografici, visto che la fotografia è stata inventata qualche annetto dopo, parlano per noi le cronache del tempo. Alcuni studiosi orientali (M.Keimatsu, K.Yau e collaboratori, Z.Xu con Y.Jiang e D.Pankenier) hanno indagato e scoperto osservazioni credibili nella provincia del Shanxi in Cina nel 770 (due volte), 773 e 775, più successive osservazioni nel 767 e 769. Le cronache occidentali, come "The Annals of Ulster to AD1131", "The AngloSaxon Chronicles" , "The Royal Frankish Annals" e altre, permettono di scoprire eventi aurorali intensissimi osservati nel 773/774, descritti come una "rossa croce nel cielo" in Inghilterra e "scudi infiammati" nel cielo della Germania (Link, 1962). Altre aurore furono notate nel 765 e 786. A quel tempo la Bibbia era l'unica chiave per interpretare questi spettacolari fenomeni naturali che dovevano sicuramente meravigliare e probabilmente anche terrorizzare non poco gli uomini di quei tempi. Infatti la citata "rossa croce" si trova descritta anche come "il segno rosso di Cristo" (Swanton, 2000). Altre osservazioni: nel 772 ("fuoco nel cielo" in Irlanda), nel 773 e 775 in Germania ("cavalieri Cristiani su bianchi cavalli), nel 765 e 786 in Irlanda. Come si può facilmente notare, molti eventi coincidono in osservazioni effettuate in diversi luoghi, come ad esempio l'Irlanda e la Cina (dove sicuramente se ne diede una descrizione e un'interpretazione diversa) . Certo che alcune descrizioni sono veramente curiose: "straordinari serpenti nel cielo della Sassonia Meridionale" (Swanton 2000). Quella del serpente è un'immagine che ricorre spesso nella descrizione delle aurore polari (Dall'Olmo 1980) e probabilmente è dovuta ai movimenti sinuosi, come enormi tende mosse dal vento, che tipicamente le caratterizzano. Per non appesantire la trattazione, ho citato solo i nomi degli studiosi che si sono occupati di cosa accadde in quegli anni e in qualche caso la data dei loro lavori. Chi desiderasse i riferimenti bibliografici completi li può trovare in un recentissimo lavoro di G.Usoskin e collaboratori (*The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame.* A&A, February 28, 2013), che è anche servito da base per la redazione dell'articolo che state leggendo.

Senza tirare in ballo la Bibbia o altre scritture noi ora sappiamo benissimo che la causa delle aurore polari è solare: le particelle del vento solare (che sono elettricamente cariche), continuamente emesse dalla corona del Sole, quando impattano contro la ionosfera interagiscono con gli atomi, gli ioni e le molecole del plasma ionosferico, inducendo dei fenomeni di assorbimento e riemissione di luce (fotoni) per effetto delle transizioni energetiche degli elettroni. A seconda delle specie ioniche o molecolari interessate in questi urti la luce emessa può variare da tonalità tra il verde e l'azzurro e tra il rosso intenso e il violetto (le croci rosse di Cristo, il cielo color rosso sangue e via discorrendo). Normalmente si vedono solo ad alte latitudini, vicino ai Poli, sia Nord che Sud, in quanto per la conformazione del campo magnetico terrestre le particelle del vento solare vengono immesse su traiettorie che passano per i poli magnetici. A volte però si osservano anche a più basse latitudini: nel 1859, durante il famoso Evento Carrigton, che prende il nome dall'astronomo inglese che osservò per primo un brillamento, cioè la parte visibile di un flare solare, vennero osservate addirittura ai Tropici e a Cuba (tra 20° e 23° di latitudine!). Segno evidente che quando il Sole "si arrabbia", cioè diventa particolarmente attivo, l'attività aurorale aumenta di pari passo. Conclusione inevitabile: anche le aurore polari sono collegate ai cicli solari. Sono l'effetto visibile sulla Terra di qualcosa che è partito dal Sole. Questo "qualcosa" sono i flare, emissioni di radiazione elettromagnetica su tutto lo spettro, dai Raggi X alle

Onde Radio, più flussi intensi di particelle del plasma coronale (segnatamente protoni) di velocità molto alta, che permette loro di raggiungere la Terra in tempi compresi tra venti minuti e qualche ora, con poco ritardo quindi rispetto alla luce emessa dal flare, che impiega otto minuti. All'arrivo delle particelle si verificano le "tempeste di radiazione", che presentano forti rischi biologici, anche la morte in caso di esposizione intensa o prolungata, ma per fortuna solo per chi si trova al di fuori dell'atmosfera, come gli astronauti, specialmente se impegnati in attività extra-veicolari. Comunque anche i passeggeri e gli equipaggi degli aerei che volano ad alta quota su rotte polari sono a rischio, tant'è che in caso di forti tempeste di radiazione le compagnie aeree spostano i voli su quote più basse e rotte lontane dai Poli (con un bel danno economico facilmente immaginabile). Il flare responsabile di questi disastri, specialmente se molto intenso, viene (quasi sempre) seguito da una Emissione di Massa Coronale, che convoglia miliardi di tonnellate di plasma coronale verso la Terra e quando si verificano le giuste condizioni il tutto si traduce in una tempesta geomagnetica, potenzialmente molto pericolosa non per la nostra salute, ma per la nostra tecnologia, che viene accompagnata dallo splendido spettacolo delle aurore polari. Più intense sono le cause, più affascinanti sono questi effetti atmosferici. Per saperne di più sui flare, l'attività geomagnetica e le "tempeste" solari rimando qui a due miei articoli pubblicati su "Meridiana": "*Flare Solari*" (n° 209 pagine15-27) , "*Space Weather*" (n° 219 pagine 11-17 e n° 220 pagine 8-17).

E adesso torniamo indietro di più di 1200 anni, all'ottavo secolo e alle sue straordinarie aurore. Ovviamente c'è stato chi se ne è occupato non dal punto di vista storico, ma da quello scientifico, ponendosi una domanda chiave: eventi così straordinari devono essere stati prodotti da cause altrettanto straordinarie. Può il Sole aver emesso flare di energia tanto elevata da produrre tutto ciò che è stato osservato in quegli anni? Come vedremo tra poco per qualcuno la risposta è no ma poi qualcun' altro, tanto per cambiare, lo ha smentito. Per capire come è andata la storia, dobbiamo partire illustrando quale metodo è stato usato per andare a ficcare il naso in eventi accaduti così tanti anni fa: quello della datazione con il ^{14}C, cominciando con lo spiegare cosa si nasconde dietro questa sigla.

In chimica, quando si è interessati alle sole proprietà del nucleo di un atomo, trascurando la sua parte negativa, cioè gli elettroni, si parla di *nuclidi*. Alcuni di questi sono stabili nel tempo, altri no e per decadimento radioattivo si trasformano più o meno velocemente in nuclidi stabili di altri elementi e sono detti per questo *radionuclidi* . Ad esempio l'Idrogeno in natura si trova con tre nuclidi: ^{1}H, l'idrogeno naturale, ^{2}H, il deuterio, e ^{3}H, il trizio. I primi due sono stabili, il terzo no. Il numero in alto a sinistra che precede il simbolo chimico dell'elemento si chiama numero di massa, ed è la somma dei protoni e dei neutroni presenti nel nucleo. Quello che caratterizza principalmente un radionuclide è il suo tempo di dimezzamento medio (o emivita), cioè il tempo che impiega una certa massa iniziale a ridursi alla metà per decadimento. Il carbonio possiede un solo radionuclide, il ^{14}C, detto anche radiocarbonio, con emivita di 5730 anni. Quindi una quantità Q di ^{14}C si riduce a 0.5Q dopo questo tempo, a 0.25Q dopo altri 5730 anni e via così. Il radiocarbonio si trasforma lentamente e inesorabilmente in un nuclide stabile dell'azoto, il ^{14}N. E' chiaro che alla lunga il ^{14}C presente sulla Terra si esaurirebbe, se non venisse continuamente "reintegrato" da qualche meccanismo naturale. La quantità di ^{14}C sul nostro pianeta viene mantenuta praticamente costante (se si escludono effetti antropogenici durante gli ultimi decenni) per effetto dei raggi cosmici, per la cattura di un neutrone termico da parte dell'azoto atmosferico e l'emissione di un protone secondo l'equazione

$$\mathbf{^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p}$$

dove n e p indicano il neutrone ed il protone rispettivamente.

Le precipitazioni atmosferiche portano il radiocarbonio al suolo, dove viene misurato principalmente negli anelli di accrescimento degli alberi. Il ^{14}C è legato soprattutto all'ossigeno sotto forma di anidride carbonica ($^{14}CO_2$), quindi tutti gli organismi che utilizzano il ciclo del carbonio per la propria vita scambiano continuamente carbonio con l'atmosfera, con la respirazione per gli animali e la fotosintesi per i vegetali,

oppure lo assimilano con la nutrizione di altri esseri viventi o molecole organiche, cioè contenenti carbonio e idrogeno. Pertanto finché un organismo è vivo, al suo interno il rapporto tra la concentrazione di ^{14}C e quella degli altri due nuclidi stabili del carbonio (^{12}C e ^{13}C) rimane costante e pari al valore medio presente nell'atmosfera. Ma quando l'organismo muore, questo rapporto cambia perché il carbonio non viene più scambiato con l'esterno e il ^{14}C diminuisce in concentrazione perché è instabile. Se ci fosse un legame tra la quantità di ^{14}C misurata in un organismo morto (un albero fossile per esempio) e la quantità media di radiocarbonio presente nell'atmosfera (quando era vivo) si potrebbe, sapendo che ogni 5730 anni se ne perde la metà, andare indietro nel tempo fino al momento della morte, ovviamente con una certa approssimazione, utilizzando quindi una sorta di "orologio nucleare" naturale. L'idea è semplice ed il metodo è applicabile, visto che questo legame esiste e la sua applicazione ha fruttato il Premio Nobel nel 1960 al chimico americano Willard Frank Libby.

I lettori più curiosi e più esigenti, in possesso di qualche basilare conoscenza della matematica delle equazioni esponenziali, troveranno nell'appendice di questo articolo come funziona nello specifico il sistema della datazione radiometrica con il ^{14}C, insieme ad alcuni numeri interessanti circa la sua concentrazione media nell'atmosfera.

A questo punto si potrebbe pensare che l'orologio al radiocarbonio, per quanto non sia affatto semplice da leggere, sia utilizzato soprattutto dagli archeologi e infatti è così. Ma non solo loro sono interessati a questa tecnica di viaggio a ritroso nel tempo, per una ragione molto semplice: l'origine del ^{14}C è cosmogenica, cioè il radiocarbonio è prodotto dai raggi cosmici, lo abbiamo visto. Ebbene, durante i massimi di attività solare i raggi cosmici vengono deflessi e raggiungono la troposfera e la stratosfera in misura minore. Il contrario succede durante i minimi di attività, per cui c'è una stretta correlazione tra l'attività solare e la concentrazione di ^{14}C nell'atmosfera, quindi di riflesso anche nei reperti fossili al suolo. Questa correlazione è illustrata nella Figura 1 e nella relativa didascalia:

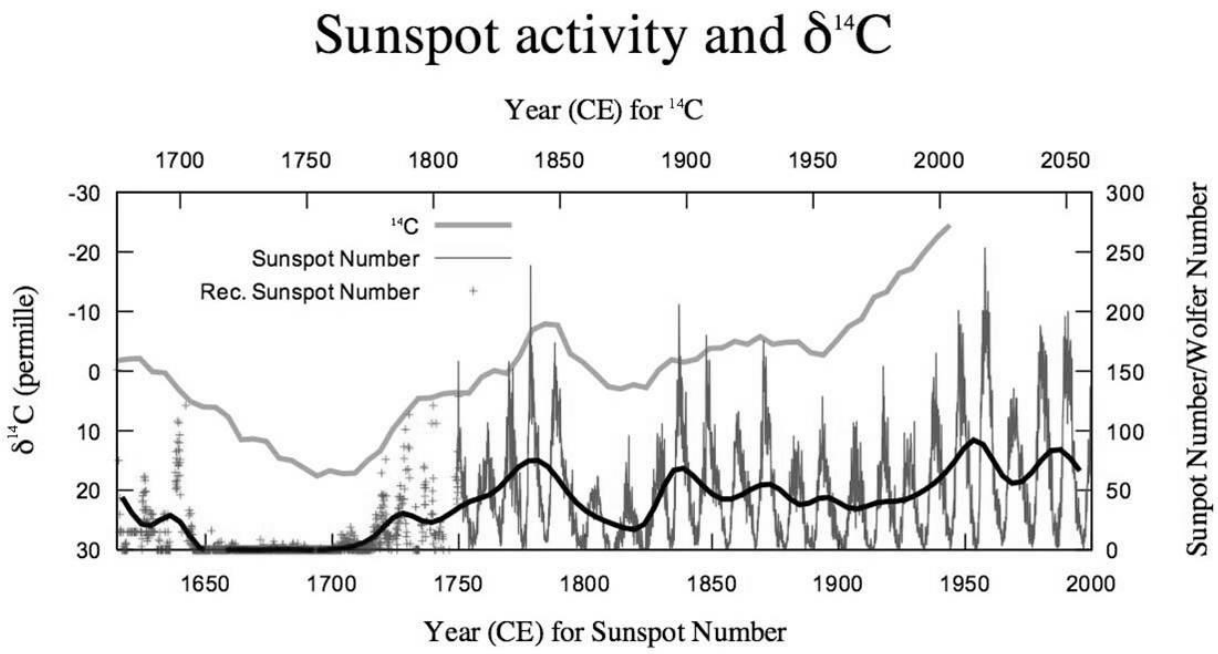


Figura 1: *Andamento delle variazioni di ^{14}C rispetto al valore medio atmosferico rapportata all'attività solare. La due scale temporali in orizzontale sono sfasate di 50 anni in quanto la datazione al ^{14}C assume il 1950 come "anno zero" dal quale partire per stabilire l'età di un reperto. Nella scala verticale a sinistra sono riportate le variazioni della concentrazione del radiocarbonio (in decimi di percentuale, o permille) e su quella verticale a destra i numeri di Wolf o sunspot number. La curva dal profilo irregolare che parte dal 1750 della scala temporale inferiore rappresenta i*

numeri di Wolf ottenuti dalle osservazioni "grezze". Sulla stessa scala le crocette precedenti il 1750 rappresentano i cicli solari ricostruiti con il ^{14}C. Notare l'evidenza del minimo di Maunder. La curva più in basso dal tratto marcato in nero è quella cosiddetta "smoothed" che rappresenta i numeri di Wolf normalizzati o International Sunspot Numbers. La curva dal tratto marcato in grigio più in alto rappresenta le variazioni della concentrazione di ^{14}C. Notare come le due curve abbiano un andamento praticamente parallelo e come in corrispondenza dei massimi la variazione in negativo del radiocarbonio sia altrettanto marcata, in quanto la maggior deflessione dei raggi cosmici porta ad una minor produzione di ^{14}C. Nella scala a sinistra sono stati riportati i valori negativi verso l'alto per dare una miglior impressione visiva dell'andamento parallelo dei cicli solari e della concentrazione di ^{14}C.

Cortesia: en.wikipedia.org

E' stato proprio utilizzando la datazione al ^{14}C utilizzando gli anelli di accrescimento degli alberi (parallelamente ad un metodo simile che utilizza il radionuclide ^{10}Be con carotaggi dei ghiacci polari) che è stato possibile dimostrare che i cicli solari, dai nostri tempi almeno fino all'anno -10000 (a partire dal 1950, che è considerato "l'anno zero" per il metodo del ^{14}C) sono sempre esistiti ed è stata confermata la loro periodicità di circa 11 anni, come previsto da R.Wolf, oltre che l'esistenza dei grandi minimi, come quello di Maunder e di periodi di attività solare molto più forti degli altri.

Ma torniamo all'ottavo secolo. F.Miyake e collaboratori (Nature, 486, 240, 2012) hanno impiegato il metodo del radiocarbonio diciamo così al contrario. Semplificando al massimo, conoscendo l'anno dell'evento (loro si sono concentrati specificatamente su quello del 775) e quindi l'intervallo temporale che ci separa dallo stesso, è come se avessero risolto l'equazione del decadimento del ^{14}C (quella presentata in appendice) non rispetto al tempo, ma rispetto alla concentrazione atmosferica del radioisotopo, che come detto dipende dall'attività del Sole. Utilizzando un modello apposito per la genesi del ^{14}C nell'atmosfera ed effettuando lunghe e laboriose serie di misurazioni al suolo, il confronto con l'equazione del decadimento porta alla conclusione che non è possibile che in quell'anno sul Sole si siano verificati uno o più flare di portata tale da giustificare l'entità di quanto osservato. Infatti dalle analisi compiute su campioni fossili di cedri giapponesi risulta un eccesso del 15 per mille delle concentrazioni del ^{14}C, che porta ad un valore medio della velocità di accrescimento atmosferico di 19 nuclidi/cm^2/sec, un valore di un ordine di grandezza superiore a quello dovuto ai raggi cosmici galattici e riportato sempre in appendice (circa 1.6 nuclidi/cm^2/sec). Pertanto, almeno secondo Miyake e gli altri, la causa di quelle eccezionali aurore non va cercata nel Sole.

E se non è stato il Sole, cose le ha prodotte? Qualcuno si è lanciato in tentativi di dare una risposta a questa difficile domanda invocando cause extra solari: D.Eichler e D.Mordecai (Astrophys. J. Lett. 761, L27, 2012) ipotizzano l'impatto di una gigantesca cometa con il Sole che avrebbe prodotto uno shock coronale tale da permettere l'espulsione di un impressionante flusso di particelle di plasma molto energetiche, altri pensano ad un gamma-burst (emissione di raggi gamma di grande intensità in tempi brevi) da parte di una stella vicina, che avrebbe convogliato raggi cosmici in quantità superiore a quella normale verso la Terra. J Allen (Nature, 486, 473, 2012) ha tentato una spiegazione ricorrendo a una esplosione di supernova relativamente vicina al Sole, ma nascosta da una densa nube di polveri (ecco perché nessuno potrebbe aver visto la supernova e tantomeno vede adesso quello che avanza della stella, cioè verosimilmente una pulsar).

Poco convinti di queste diciamo "esotiche" teorie, G.Usoskin dell'Università di Oulu in Finlandia ed altri ricercatori hanno ripreso in mano la questione. Più di un anno di accurate analisi sulle querce fossili della zona del Reno e del Meno in Germania (uno dei luoghi dove fu osservato l'evento del 775) e l'esame di due serie di dati della concentrazione del ^{10}Be nei ghiacci polari (Antarctic Dome Fuji series) i cui risultati sono

stati presentati nel loro articolo citato in precedenza, hanno permesso di stabilire che Miyake e collaboratori hanno sovrastimato i veri risultati. Usoskin e gli altri hanno utilizzato un modello di ciclo del ^{14}C diverso da quello dei loro colleghi, un modello a sei stadi, presentato e illustrato in Figura 2:

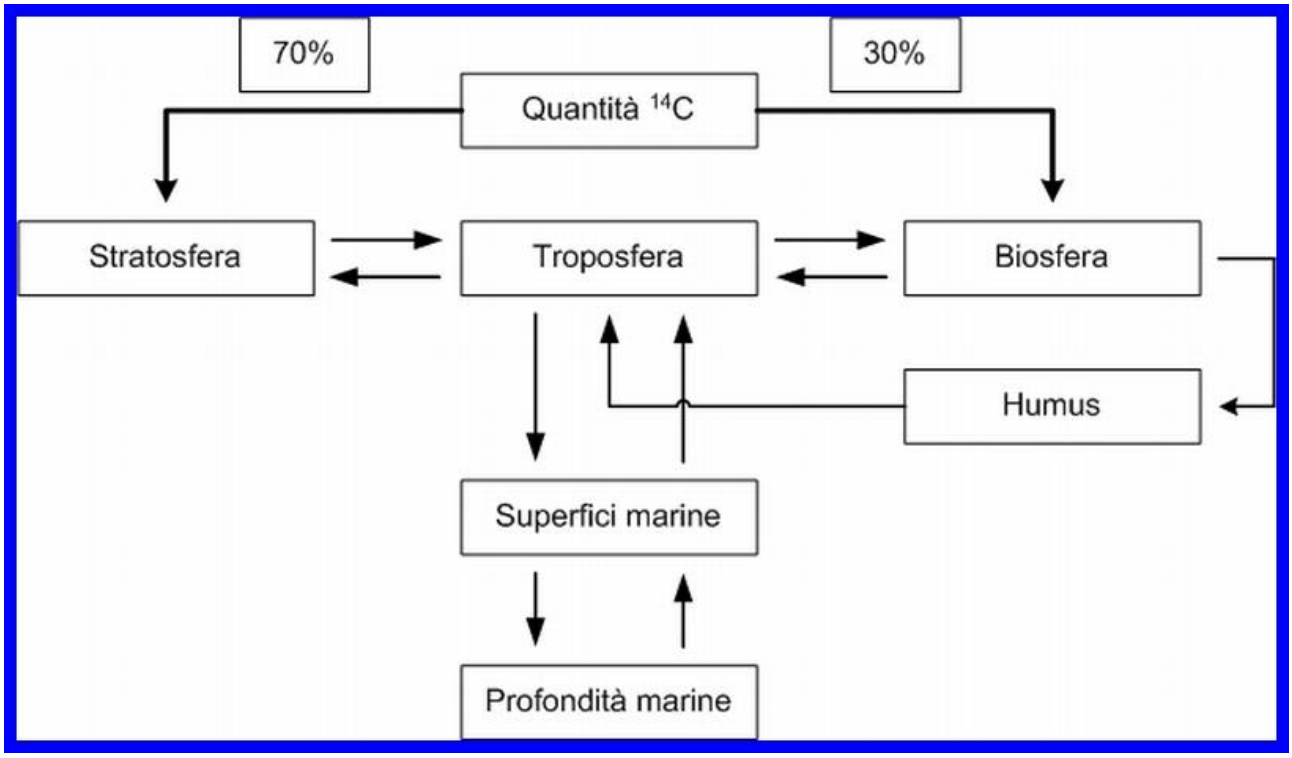


Figura 2: *Il modello a sei stadi per la produzione e la circolazione del ^{14}C nell'atmosfera e al suolo utilizzato da Usoskin e collaboratori nel loro lavoro di indagine sull'evento del 775, che ha smentito i risultati precedenti di F.Miyake e collaboratori. Questi ultimi avevano utilizzato un modello a quattro stadi (four-box model). Notare come il modello usato da Usoskin preveda che i tre quarti di ^{14}C generati dall'impatto dei neutroni termici dei raggi cosmici galattici siano trasferiti direttamente nella stratosfera e quindi il radionuclide, principalmente sotto forma di $^{14}CO_2$ possa essere scambiato direttamente con la troposfera, cioè la parte di atmosfera che permette condizioni di vita naturali sulla Terra.*

Rielaborazione di M.Gatti dall'originale contenuto in "The AD775 cosmic event revisited: the Sun is to blame", citato nel testo.

Il valore della quantità globale di ^{14}C ottenuto da Usoskin e collaboratori per l'anno 775, 1.1-1.5 x 10^8 nuclidi/cm^2, può essere associato ad un forte, ma non inspiegabilmente forte, evento solare (o una sequenza di eventi) che ha prodotto flussi di particelle dirette verso la Terra tali da dare origine alle aurore osservate. L'entità di questo evento è stata stimata da 25 a 50 volte maggiore di quella che ha dato origine alla tempesta di radiazione del 23 Febbraio 1956, la più intensa osservata finora.

Quindi l'imputato Sole, assolto in primo grado da Miyake, viene dichiarato colpevole in appello da Usoskin e soci per quanto riguarda il 775 e, verosimilmente, anche per tutto il resto che è successo in quei lontanissimi anni. A questo punto ci si potrebbe chiedere come mai in quel periodo la nostra stella sia stata così attiva. La vera risposta forse non la sapremo mai, ma una recente teoria è talmente affascinante che merita di essere quantomeno accennata in questa sede: recenti osservazioni effettuate da H. Maehara dell'Università di Kyoto con il satellite Kepler hanno rivelato l'esistenza di flare con energie da uno a tre ordini di grandezza maggiori di quelli prodotti dal Sole su stelle di tipo solare, quindi con la medesima temperatura superficiale (5600K-6000K) ma con periodo di rotazione molto diversificato e comunque

maggiore di 10 giorni. L'energia media di un flare solare è di 10^{25} J, quelle ricavate dalle analisi statistiche di Maehara vanno da 10^{26} J fino a 10^{28} J, con una frequenza di accadimento di uno ogni circa 800 anni per le energie di 10^{27} J e di uno ogni 5000 anni per le energie di 10^{28} J. Questi mostri energetici sono stati subito battezzati *superflares*. Per capire che razza di energie siano in gioco, pensate che un grosso sasso con la massa di 1 Kg, che cade da un metro di altezza su un nostro piede (fracassandolo per bene) ci scarica addosso una energia di 9.8 J. Forse nemmeno se ci cascasse sul piede l'intera catena alpina riusciremmo a raggiungere energie come quelle che vengono rilasciate da un flare diciamo così…normale, per non parlare dei superflares. K. Shibata e lo stesso H. Maehara, più altri collaboratori delle Università di Kyoto, Tokio, Nagano e A.R. Choudhuri dell'Indian Institute of Science di Bangalore si sono posti una questione intrigante: eventi simili potrebbero accadere (o essere accaduti) anche sul nostro Sole? La loro risposta, pubblicata nell'articolo "*Can Superflares Occur on Our Sun*?" (Publ. Astron. Soc. Japan, vol.65, n°3, 2013), è di fatto negativa ma, prese le dovute cautele senza farsi prendere dall'entusiasmo, non si può escludere del tutto tale possibilità. In particolare una delle conclusioni di Shibata e collaboratori è che il tempo medio che sarebbe necessario per accumulare una quantità di flusso magnetico tale da dare poi vita ad un superflare solare è di circa 40 anni, un tempo diciamo ragionevole. Però il fatto è che il valore del flusso necessario ad innescare la "bomba" risulta di un ordine di grandezza superiore a quello previsto dagli attuali modelli della dinamo solare, il complesso meccanismo che regola tutta l'attività magnetica del Sole. Ammesso che ciò sia possibile, è comunque interessante notare che questo tempo è comparabile con quello del minimo di Maunder (circa 70 anni). Quindi questo potrebbe spiegare da una parte l'esistenza del minimo stesso, dall'altra la possibilità del rilascio di un superflare, visto che per 70 anni il Sole praticamente, non avendo avuto attività, potrebbe aver "fatto la scorta" di flusso necessaria. Questo ovviamente non vuol dire che al termine del minimo di Maunder, o di altri grandi minimi del passato, sia stato prodotto un superflare o che questo possa accadere chissà quando nel futuro. Il flusso potrebbe essere stato immagazzinato a lungo e poi rilasciato producendo serie di flare per così dire "normali". Pertanto è prematuro concludere che un flare di energia di 10^{28} J possa accadere sul Sole, almeno sulla base delle attuali teorie sulla dinamo solare. Però sognare non costa nulla, quindi chi può escludere che nella straordinaria attività del secolo VIII non ci sia lo zampino di qualche superflare solare? Solo il tempo potrà dirlo, forse.

Siamo alla fine della storia, quindi tiriamo qualche conclusione: anche se non è possibile associare una specifica particolare aurora con un evento che sia rilevabile con il metodo del ^{14}C, un chiaro insieme di aurore polari osservate tra il 770 e il 776 suggeriscono l'eventualità di una elevata attività solare intorno all'anno 775 in particolare. Le successive osservazioni intorno al 765-767 e al 786 forniscono un ulteriore prova della ciclicità di circa 11 anni dell'attività stessa. In secondo luogo, l'entità dell'evento del 775 pone inevitabilmente un forte restrizione al limite superiore di un evento solare (esclusi i fantomatici superflares), cosa importante per chi si occupa della fisica del Sole e delle stelle in generale.

Appendice

Approfondimenti sul decadimento e la datazione al ^{14}C

Una data quantità di ^{14}C diminuisce in modo regolare seguendo l'equazione del decadimento:

$$\mathbf{c = c_0 e^{-\Delta t/\tau}} \qquad \mathbf{(1)}$$

dove c è la concentrazione di ^{14}C misurata in un certo tempo t_0, c_0 è la concentrazione media di ^{14}C nell'atmosfera, τ è la vita media del ^{14}C, pari al tempo di dimezzamento diviso per il logaritmo naturale di 2, cioè 5730 anni/ln 2 = 8267 anni e infine Δt è l'intervallo di tempo trascorso tra la morte dell'organismo e il tempo t_0.

Passando ai logaritmi nella equazione (1) si può, con semplici passaggi, risolvere la stessa rispetto a Δt, ottenendo:

$$\mathbf{\Delta t = - \tau \ln(c/c_o) \quad (2)}$$

Poiché c, c_0 e τ sono noti, l'equazione (2) permette di scoprire quanti anni sono passati tra la morte dell'organismo e il momento della determinazione della concentrazione di ^{14}C al suo interno, cioè "l'età" del reperto. Notare che il valore ottenuto è negativo, il che è corretto, in quanto l'intervallo Δt va "all'indietro" nel tempo. Ovviamente c'è un margine di errore in tutto questo. Le datazioni con il ^{14}C hanno una tolleranza che va in media da ±30 a ±130 anni a seconda del campione utilizzato.

Per quanto riguarda il valore di c_0, bisogna dire che vari modelli del ciclo del ^{14}C danno risultati non completamente in accordo tra loro: una velocità di accrescimento di 1.75-2.3 nuclidi/cm^2/sec (O'Brien 1979, Masarik e Beer 1999, Goslar 2001, Usoskin *et al.* 2006) è consistente con il valore di 1.76-2.0 ottenuto attraverso una stima diretta delle riserve di radiocarbonio con analisi specifiche al suolo (Suess 1965, Damon *et al*. 1978, O'Brien 1979), per contro l'utilizzo del classico ciclo del carbonio nell'atmosfera porta ad un valore tipico di 1.6-1.7 nuclidi/cm^2/sec relativamente al periodo pre-industriale. Come si vede le cose coincidono in modo solo marginale tra vari modelli e saranno necessarie ulteriori analisi in futuro. Per la ricostruzione degli intervalli di tempo con il radiocarbonio viene comunque impiegato il valore relativo al periodo pre-industriale. Va infine detto che la quantità totale di ^{14}C nell'atmosfera dipende da diversi fattori, tra i quali quello che incide maggiormente per la fisica solare è la sua modulazione dovuta ai cicli di attività del Sole.

---

*Nota: il modello della datazione al 14C è stato presentato in questo articolo in maniera volutamente semplificata e approssimata. Chi è interessato a una trattazione completa e rigorosa la può trovare nell'ottima monografia di Ilya G. Usoskin "**A History of Solar Activity over Millennia**", Living Rev. Solar Phys., 5, 2008, 3. (*http://www.livinreviews.org/lrsp-2008-3*).*

Un importante strumento di monitoraggio dell'attività solare

Il radio flusso a 10.7 cm.

di Mario Gatti *

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

Dal Sole arriva tutta la luce del mondo. Non solo in senso figurato, ma anche fisico. Infatti la nostra stella irradia in tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico, da quelle più alte (Raggi X) a quelle più basse (onde radio). Ed è proprio in questa porzione di frequenze, in un intervallo che va da qualche decina di MHz a oltre 10 GHz , quindi con lunghezze d'onda tra 10 metri (onde radio decametriche) e qualche millimetro (onde radio millimetriche), che ne esiste una particolare alla quale viene dedicato questo breve articolo. Questa frequenza, pari a 2800 MHz (2.8 GHz) corrisponde ad una lunghezza d'onda di 10.7 cm. ed è chiamata per questo *radio flusso a 10.7 cm*, spesso indicato con F10.7 o anche semplicemente F10. Ma partiamo con un po' di storia.

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. Anche se poi le sorti di questa grande battaglia dei cieli furono infine favorevoli agli inglesi, si può immaginare con quale "*british surprise*" questi 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 ci sono arrivate? 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. 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'accecamento 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 tanto che è stato coniato il termine "radiosole" quando ci si riferisce all'emissione in onde radio.

Maggiore è la lunghezza d'onda, tanto più il radiosole si estende oltre la superficie visibile, cioè la fotosfera. Ad una lunghezza d'onda di 3 metri le sue dimensioni sono circa il doppio di quelle del disco solare visibile. Un'altra caratteristica importante riguarda la frequenza: se "si scende" verso la stella, muovendosi idealmente dalla corona verso la fotosfera, si ha emissione radio a frequenze sempre maggiori. Quindi, se i nostri occhi fossero sensibili alle onde radio, osservando il radiosole perderemmo finalmente quella sensazione (peraltro falsa) di "rotondità" tanto familiare, che verrebbe sostituita da una nuvolotta informe, senza capo né coda e in continuo cambiamento. Il vero Sole è fatto così, non come appare a noi.
Come detto, l'emissione radio è continua, ma a volte, in corrispondenza di quei poderosi eventi energetici chiamati flare, anche il radiosole produce dei picchi di emissione chiamati *burst radio*, che potremmo tradurre con "lampi radio". Esistono 5 tipologie di questi fenomeni, ma quelli che interessano in particolare chi si occupa di Space Weather (per il significato e l'illustrazione di questo termine si vedano i numeri 219 e 220 di Meridiana) sono quelli di tipo II e IV, in quanto sono degli indicatori quasi sicuri del rilascio di una emissione coronale di massa successiva al flare.

In questo panorama così vasto andiamo a focalizzare la nostra l'attenzione sul citato radio flusso a 10.7 cm. iniziando anche qui dalla sua storia. Immediatamente dopo la seconda guerra mondiale Arthur Covington e i suoi collaboratori del National Research Counsil di Ottawa, in Canada, assemblarono un radiotelescopio mettendo insieme tutti gli avanzi di Radar ed altri apparecchi residuati del conflitto. Puntarono il loro strumento su molti oggetti celesti, misurando emissioni generalmente deboli o molto deboli, tranne che in un caso: puntandolo sul Sole, che si rivelò quindi subito essere la sorgente radio più brillante tra tutte. Lo strumento di Covington operava alla frequenza di 2800 MHz e fu subito chiaro che il flusso radio a quella frequenza era variabile. La prima domanda che si posero quegli studiosi fu se il fenomeno interessasse piccole porzioni dell'astro o tutta la stella nel suo insieme e alla fine fu chiaro che il contributo maggiore dell'emissione totale a 10.7 cm. veniva prodotto in prossimità dei gruppi di macchie solari. Ora noi sappiamo, con maggior precisione, che l'origine del radio flusso a 10.7 cm sono le regioni attive, quella zone del Sole che appaiono brillanti se osservate sulla corona nell'ultravioletto o nei raggi X e che quasi sempre hanno come controparte in fotosfera proprio i gruppi di macchie. L'emissione radio avviene tra l'alta cromosfera e la bassa corona e per spiegarla sono stati proposti due meccanismi, sebbene ci sia ancora un certo dibattito tra i fisici solari per stabilire quale dei due abbia maggiore rilevanza rispetto all'altro. Le due cause dell'emissione a 10.7 cm. sono la radiazione di frenamento termica (dovuta ad elettroni che irradiano quando vengono deflessi da altre particelle cariche) e la radiazione giromagnetica, detta anche di sincrotrone per l'analogia con quanto accade in un acceleratore di particelle, dovuta alla radiazione prodotta sempre da elettroni accelerati e invorticati su traiettorie curve da parte del campo magnetico solare. La questione è complessa in quanto i moti di queste particelle non sono individuali, come in un gas, ma sono moti collettivi non trattabili con la fisica ordinaria, in quanto facenti parte di un plasma ad altissima temperatura immerso in un campo magnetico e ad esso per così dire accoppiato. La fisica di questi sistemi è detta Magnetoidrodinamica e chi la conosce sa quanto sia complicata.

Tra il 1946 e il 1990 le misure di F10.7 sono state compiute a Ottawa. Dal 1990 il programma sinottico di osservazioni è stato affidato al DRAO (Dominion Radio Astrophysical Observatory) con sede a Penticton, sempre in Canada, che tutti i giorni fornisce tre valori del radio flusso, alle 18.00, 20.00 e 22.00 di Tempo Universale, più la media dei tre valori e la media degli ultimi 90 giorni. Una questione sempre canadese, quindi.

A questo punto emerge una considerazione quasi ovvia ma fondamentale: in quanto originato in prossimità delle regioni attive, o se preferite dei gruppi di macchie, F10.7 è strettamente correlato con l'attività magnetica del sole, quindi in ultima analisi costituisce un eccellente indice di attività solare per lo studio dei cicli, al pari dei numeri di Wolf, degli indicatori coronali (osservazioni della

corona in particolari righe monocromatiche di emissione), dell'area dei gruppi di macchie, del conteggio dei flare e delle loro classi energetiche. Il vantaggio del radio flusso è principalmente quello di non dipendere dalle condizioni atmosferiche (è sempre misurabile, ogni giorno) e di essere completamente obbiettivo, non essendo influenzato dall'osservatore come nel caso del conteggio delle macchie. Infatti F10.7 non si osserva, ma appunto si misura. I dati relativi a F10.7 coprono ininterrottamente il periodo tra il 1948 e il giorno d'oggi e solo i numeri di Wolf coprono un intervallo temporale decisamente più vasto, visto che l'inizio del Ciclo 1 è stato datato dallo stesso Wolf al 1755, in base alle sue osservazioni ed alle rielaborazioni di precedenti osservazioni fatte da altri astronomi . Ed è questo che ovviamente fa del conteggio delle macchie l'indice di attività solare ancora più usato, anche se, come si vede nella Figura 1 che segue, F10.7 non sfigura affatto, infatti è evidente come anch'esso segua dei cicli con la stessa periodicità di quelli delle macchie, anche se con alcune differenze, delle quali ci occuperemo tra poco.

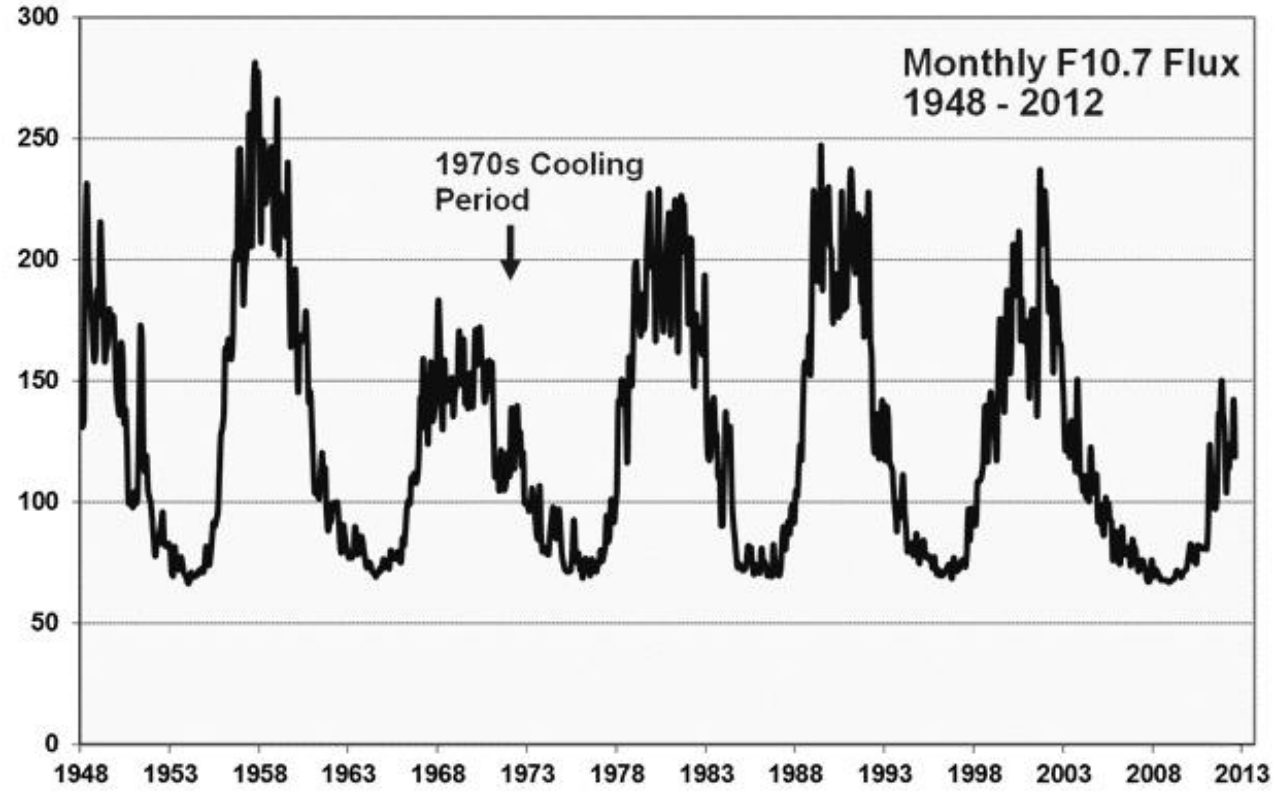


Figura 1: Andamento dei valori del radio flusso a 10.7 cm. tra il 1948 e il 2012. E' evidente la modulazione del segnale che segue un andamento ciclico, del tutto parallelo a quello del numero di macchie solari, fornendo quindi preziose indicazioni sull'andamento dei cicli solari.

Fonte: http://wattsupwiththat.com

Le figure 2 e 3 della pagina seguente servono invece a comparare l'andamento dei due indicatori relativamente allo scorso ciclo 23 e all'attuale ciclo 24 in corso:

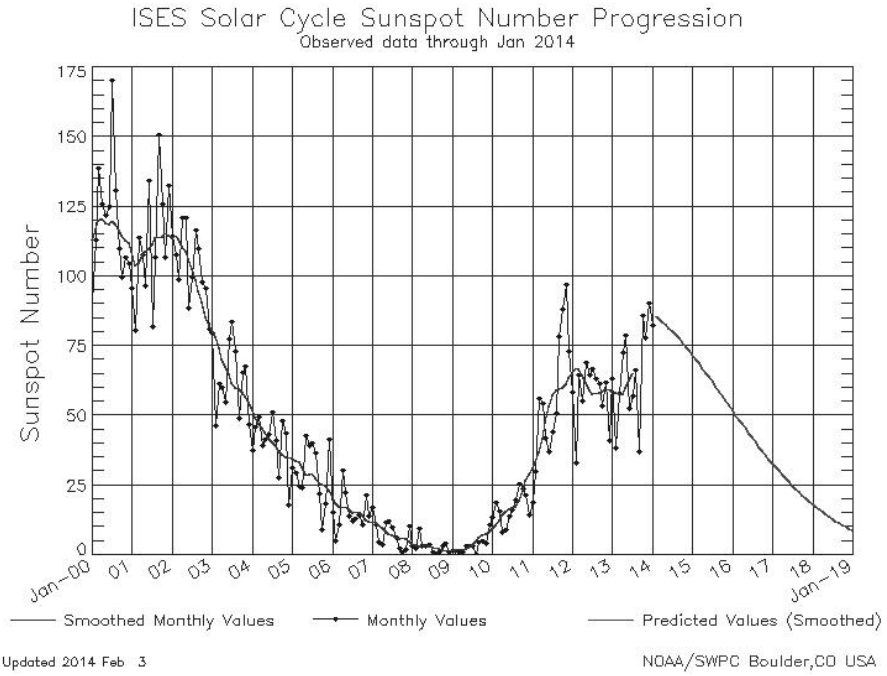


Figura 2: I valori dei numeri di Wolf normalizzati (per il significato di questo termine si veda la nota alla fine dell'articolo) aggiornato a Gennaio 2014, da cui emergono il doppio massimo del ciclo 23, il primo massimo del ciclo 24 intorno a Novembre-Dicembre 2011, il massimo secondario di Dicembre 2013 probabilmente ancora in corso e l'estrema debolezza del ciclo 24 rispetto al suo predecessore. La linea irregolare che unisce i puntini neri segue i valori delle medie mensili, quella nera continua è la curva, detta "smoothed" che fornisce l'andamento dei valori normalizzati e la riga nera a forma di mezza parabola sulla destra è la curva previsionale per la parte rimanente del ciclo 24.

Fonte: http://www.swpc.noaa.gov

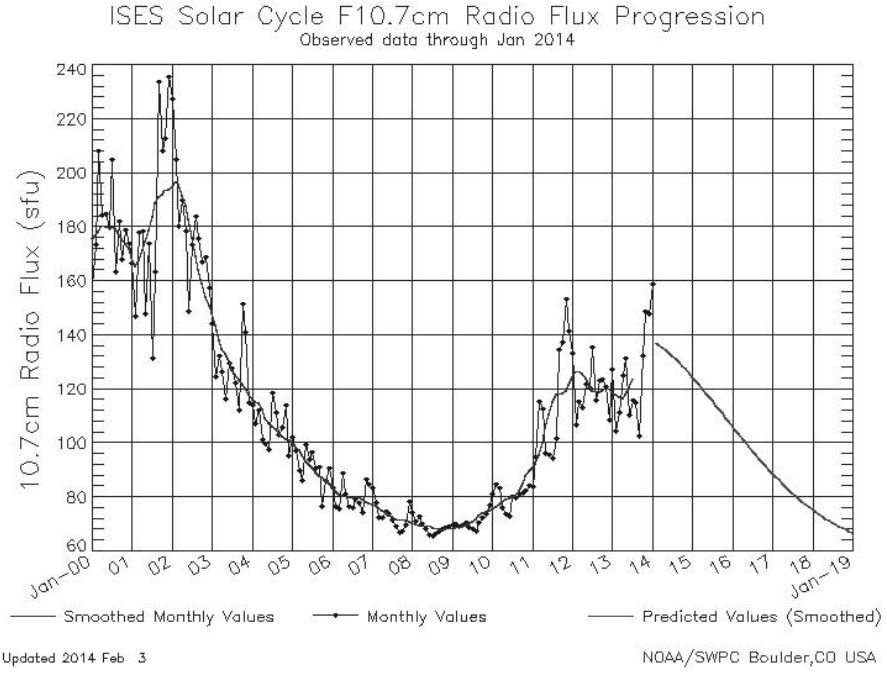


Figura 3: Lo stesso scenario della figura precedente, con lo stesso significato delle varie curve, ma relativo ai valori di radio flusso a 10.7 cm. aggiornati sempre a Gennaio 2014. Le due figure mostrano grafici molto simili tra loro, ma esistono delle differenze che sono ampiamente discusse nel testo.

Fonte: http://www.swpc.noaa.gov

Ed è proprio dall'esame di queste due figure, che di fatto presentano due scenari a prima vista identici, che emergono dei particolari che invece li distinguono l'uno dall'altro. In primo luogo quando il Sole attraversa un periodo di minimo, i numeri di Wolf vanno a zero, e l'assenza di macchie può perdurare per molti giorni, o anche per mesi (come è successo tra Luglio e Agosto del 2009). Al contrario, il radio flusso a 10.7 cm. anche ai minimi di attività non scende mai a zero, ma rimane assestato su un valore intorno alle 67 unità. L'unità di misura per F10.7 è detta "sfu" che sta per Solar Flux Unit, o unità di flusso solare. Equivale a 10^{-22} W per m^2 per Hz. E' impiegata anche un'altra unità di misura, detta Jansky (simbolo Jy). 1 sfu è pari a 10000 Jy. I minimi di attività del Sole coincidono con quelle che si chiamano condizioni di radiosole quieto, durante i quali permane questa residua attività radio, detta anche componente S.

La seconda questione riguarda l'evidente sfasamento temporale tra i numeri di Wolf ed i valori di radio flusso. Il ciclo 23 ha avuto due massimi, uno principale ed uno secondario a distanza di circa due anni l'uno dall'altro (cosa per altro normale e presente in misura più o meno marcata in quasi i tutti i cicli solari ben studiati). Mentre per quanto riguarda le macchie il primo massimo è stato più intenso del secondo (massimi numeri di Wolf normalizzati pari a circa 120 e 113 rispettivamente) per il radio flusso è stato il contrario: primo massimo meno intenso del secondo (circa 180 sfu contro circa 196 sfu) ed i due periodi di massimo, per i numeri di Wolf e per F10.7, non coincidono, ma sono sfasati nel tempo. Questo "ritardo" del radio flusso nei suoi valori al massimo del ciclo, rispetto ai numeri di Wolf, è stato osservato per diversi cicli in misura più o meno marcata. Per esempio nel ciclo 21 è stato di circa 17 mesi mentre per quello successivo i due indicatori sono apparsi più o meno in fase uno con l'altro. Se invece di paragonare i valori sugli interi cicli si restringono gli intervalli temporali, allora si nota come se il Sole presenta per un certo periodo di maggiore attività per quanto riguarda le macchie, il radio flusso lo segue con un mese o due di ritardo. E' quello che è successo in tempi recentissimi: tra il mese di Dicembre del 2013 e quello di gennaio del 2014 il sole ha probabilmente presentato un massimo secondario nell'emisfero Sud (come previsto da R. C. Altrock, si veda il numero 223 di meridiana in merito) ed ecco che un mese dopo, a cavallo tra Gennaio e Febbraio 2014, F10.7 ha presentato per diversi giorni valori attorno ai 190 sfu, circa 40 unità in più rispetto alla media di 150 sfu degli ultimi 90 giorni, mentre i numeri di Wolf, pur rimanendo abbastanza elevati (relativamente comunque alla debolezza del ciclo in corso), hanno presentato una leggera flessione. Una possibile spiegazione di questo ritardo sistematico di circa un mese (se prendiamo in considerazione solo brevi periodi di tempo, mediando su tutto un ciclo le cose non sono così semplici) l'hanno proposta K. B. Ramesh e N. Vasantharaju del Indian Institute of Astrophysics in un articolo, ancora in corso di pubblicazione, dal titolo "Temporal offsets among Solar activity indicators" cioè sfasamenti temporali tra indicatori dell'attività solare (ArXiv: 1401.3999v1, pag. 4). Non è una spiegazione né facile né banale, ma proviamo a capirla ugualmente, in parole semplici.

E' ben noto che i gruppi di macchie solari sono prodotti dal raffreddamento del plasma fotosferico causato dall'emergere, da sotto la fotosfera, di flussi magnetici che "escono" da una certa zona, si sollevano sopra la fotosfera e poi "rientrano" in una zona adiacente. Questi "tubi di flusso", così sono chiamati, presentano alle loro estremità due polarità opposte, scambiate di posizione nei due emisferi N e S della stella. Le stesse polarità che si incontrano nei gruppi di macchie solari e che ad ogni ciclo undecennale (ciclo di Wolf-Schwabe) si invertono nei due emisferi (legge di Hale). Le macchie solari si possono formare solo se l'intensità del campo magnetico all'interno dei tubi di flusso supera un valore minimo di circa 1500 G (il Gauss, simbolo G, è un'unità di misura per i campi magnetici). Ci sono inoltre delle macchie, non osservabili in luce visibile, ma evidenti nell'infrarosso), che si formano in una regione detta OMR (Opacity Minimum Region) che si trova 50 Km. al di sotto della superficie visibile. Alcune regioni attive, che altro non sono quindi che quelle parti della stella dove si innescano questi complessi meccanismi magnetici, in particolare quelle che producono grandi gruppi di macchie solari, si ripresentano una e anche due – tre volte

dopo il loro primo transito sull'emisfero visibile del Sole. Ad ogni loro ritorno, però, sono magneticamente sempre più deboli quindi può succedere che il campo magnetico scenda sotto la soglia di 1500 G e non si osservino macchie in superficie anche se verosimilmente è possibile che si formino quelle 50 Km "più in basso". 50 Km. sono tanti per un essere umano (specialmente se deve farli a piedi), ma sono una nullità nella scala di grandezza del Sole. Eppure sono fondamentali e basta fare due più due per accorgersene. Se una regione attiva di ritorno non produce più macchie visibili, un osservatore (che non usa l'infrarosso) non le vede, non le conta quindi il numero di Wolf si abbassa rispetto alla rotazione precedente, perlomeno relativamente a quella particolare regione.
Poiché però il radio flusso a 10.7 cm. come detto origina proprio dalle regioni attive, quelle di ritorno avranno magari un campo magnetico residuo di intensità tale da non riuscire a produrre macchie, ma in grado di innescare comunque il meccanismo di emissione radio, quindi i valori di F10.7 si presentano ancora elevati. Poiché una rotazione del Sole vista da Terra (rotazione di Carrington) dura 27.5 giorni, quindi circa un mese, ecco una possibile spiegazione dello sfasamento mensile tra i picchi dei numeri di Wolf e quelli di F10.7. Non si tratterebbe dunque di un vero ritardo, ma di un abbassamento relativo dei numeri di Wolf rispetto ai valori di radio flusso causato dal campo magnetico residuo delle regioni di ritorno. Per dare un'idea di questo sfasamento temporale prendiamo come esempio i mesi di Dicembre 2013 e Gennaio 2014: il primo ha presentato un numero di Wolf medio normalizzato di 90.3, il secondo di 82,0 quindi Dicembre 2013 è stato un mese più "forte", se pur di poco di quello successivo. Ora prendiamo due giorni in particolare: il 7 Dicembre 2013 F10.7 presentava un valore di157 sfu con una media sui 90 giorni di 131 sfu. e un mese dopo, il 7 Gennaio 2014 i due valori sono stati 237 sfu e 150 sfu rispettivamente.

Se si potesse, cosa da non fare mai, considerare i numeri di questi due soli mesi, potremmo concludere che il Sole ha presentato un massimo per le macchie in Dicembre 2013 e per il radio flusso a 10.7 cm. nel Gennaio 2014. Conclusione poco seria, in quanto questi conti vanno fatti sull'arco di più mesi se non a volte di anche uno - due anni, comunque i numeri parlano chiaro in ogni caso. Va anche detto che quanto detto non è una legge, una regola ferrea. Il Sole presenta spesso comportamenti a volte strani, a volte addirittura inspiegabili (lo sta facendo in particolare proprio in questo ciclo 24 in corso) ed anche gli sfasamenti temporali tra i vari indicatori della sua attività non fanno eccezione. Per finire, un' ultima caratteristica del nostro radio flusso: a volte, non sempre però, in corrispondenza di flare di potenza medio-alta vengono prodotti quelli che si chiamano radio burst a 10.7 cm. detti anche "tenflare", letteralmente "flare dieci" e l'origine del nome dovrebbe essere evidente. Per pochissimi minuti, quasi sempre uno o due, raramente qualcuno in più, F10.7 presenta un'impennata di emissione che può superare anche di diverse decine di sfu l'ultimo valore misurato a Penticton alle 20:00 TU, che è quello di riferimento giornaliero. Veri lampi radio monocromatici quindi, brevissimi e intensi. Il rilascio di una emissione coronale di massa (che può potenzialmente diventare pericolosa per noi terrestri) in seguito all'osservazione di un tenflare, unita a quella di burst radio di tipo II e IV (che non sono monocromatici, ma riguardano i primi una banda di frequenza di circa 50 MHz e i secondi l'intero spettro radio) è talmente probabile che converrebbe tentare almeno una volta di giocarsi al lotto un terno secco con i numeri 2,4 e 10. Io non l'ho mai fatto, non perché non mi fidi del Sole, ma perché non gioco al lotto così vinco ad ogni estrazione.

Nota: i numeri di Wolf normalizzati citati nel testo sono quelli forniti dal Solar Influences Data Analysis Center (SIDC) di Bruxelles e sono chiamati anche ISN (International Sunspots Numbers). Sono la rielaborazione dei valori grezzi calcolati da ogni singola stazione di osservazione del network di Osservatori solari collaboranti con il SIDC.

I valori dei numeri di Wolf riportati a proposito dei mesi di Dicembre 2013 e Gennaio 2014 sono valori provvisori forniti dal SIDC, in quanto gli ISN definitivi vengono pubblicati da tre a sei mesi dopo il periodo di interesse. I valori di F7.10 forniti dal DRAO di Penticton e utilizzati nel testo sono invece sempre quelli ufficiali.

*Reference contacts: mario.gatti@isisbisuschio.it, osservatorio@isisbisuschio.it

A proposito del Sole

Una rettifica e una curiosità

Mario Gatti

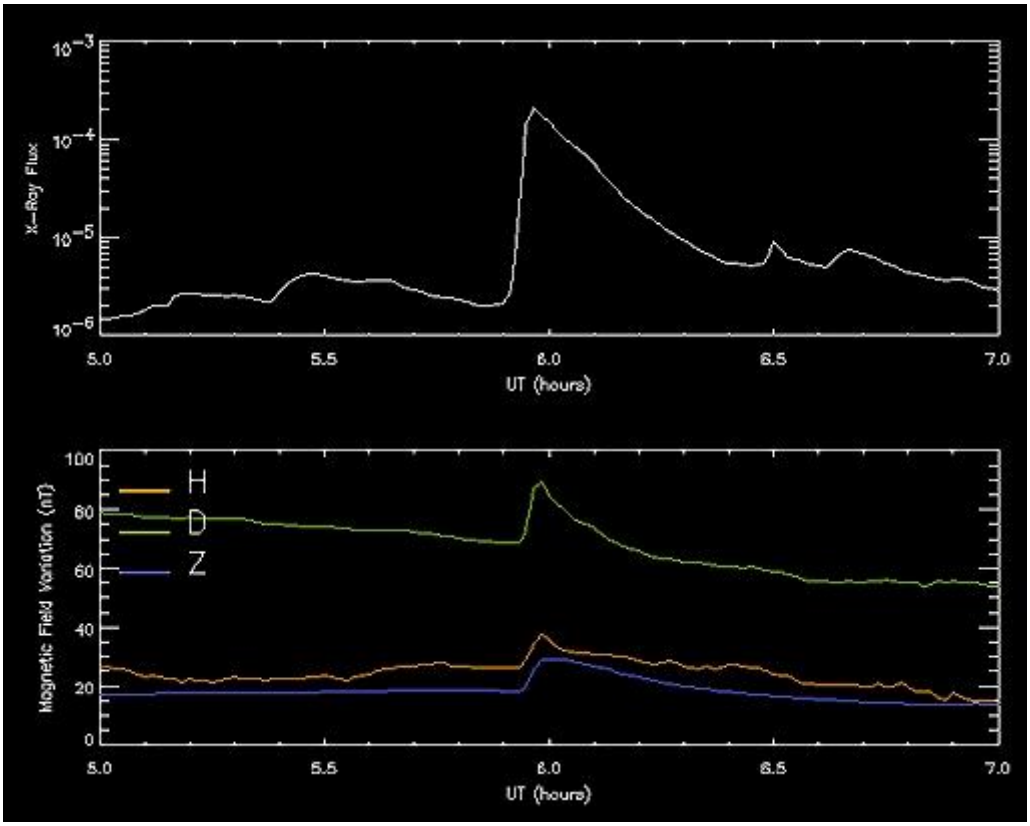
Nello scorso numero 229 di Meridiana, in chiusura del mio articolo "Il radio flusso a 10.7 cm" (pagine 9-16), ho accennato brevemente ai cosiddetti "Tenflare", definendoli come delle impennate di emissione alla lunghezza d'onda indicata, quindi monocromatiche, molto brevi, della durata di pochi minuti e con intensità di flusso superiori di diverse decina di unità rispetto all'ultimo valore misurato. Ho fatto questa affermazione per esperienza personale: nell'Osservatorio dove lavoro, quello dell'ISIS Valceresio di Bisuschio (Varese), seguo da oltre cinque anni l'attività solare e geomagnetica e, quando mi è capitato di rilevare dei Tenflare, questi hanno sempre avuto le caratteristiche che ho descritto. Evidentemente, ma la cosa non mi stupisce, visti i "tempi del Sole", cinque anni sono pochi. Infatti, puntuale come un treno in orario ecco che il Sole ha provveduto a smentirmi seccamente, quindi mi vedo costretto a scrivere una doverosa rettifica. Cosa è successo?

Il 25 Febbraio scorso una regione attiva solare (numerata come 11990, che però altro non era che il terzo passaggio sul disco delle precedenti regioni 11944 e 11967, le più grandi come estensione dell'intero attuale ciclo solare) ha prodotto alle 00:49 di Tempo Universale (le 01:49 per noi) un flare di classe X4.9, quindi di potenza alta. A questo evento, puntuale come quasi sempre in questi casi, è stato associato un Tenflare, solo che la sua durata è stata di 85 minuti e il valore di picco, raggiunto alle 00:45 TU è stato di ben 3700 sfu (unità di misura per il radio flusso, per la cui definizione si veda il citato articolo). Alla faccia della breve durata e dell'intensità di qualche decine di unità superiore a quella di fondo. Un Tenflare si ritiene "innescato" quando il valore di radio flusso eguaglia o supera il doppio del valore misurato alle 12:00 TU del giorno in corso, o di quello precedente (a seconda che l'evento segua o preceda il mezzogiorno di tempo universale) e concluso quando l'intensità ritorna al di sotto di questa soglia. In questo caso il valore di picco è stato di ben 3700 sfu, contro i 171 del valore di riferimento. Altro che qualche decina. Ma non basta…

Alle 13:57 TU dello scorso 2 Aprile, un flare di classe M6.5, evento di potenza medio-alta, emesso dalla regione attiva 12027 è stato accompagnato da un Tenflare con caratteristiche più o meno simili: durata di 26 minuti e stesso picco di intensità: 3700 sfu contro i 153 di riferimento. Insomma il Sole mi ha rifilato proprio due begli schiaffoni e io faccio ammenda come d'obbligo. Però, tanto per giustificare quanto da me affermato un paio di mesi fa, tra i due eventi illustrati, di portata forse eccezionale, ce n'è stato anche uno normalissimo, con le caratteristiche descritte da me: un Tenflare di soli tre minuti, con picco di 360 sfu contro i 146 di riferimento, che ha accompagnato un flare di classe X1.0 emesso alle 17:48 TU del 29 Marzo scorso dalla regione attiva 12017. Io li avevo sempre visti così, ecco perché ho scritto quel che ho scritto.

E ora veniamo alla curiosità del titolo: si tratta di un evento piuttosto raro conosciuto come "Effetto Flare" o in inglese "Geomagnetic Crochet", che potremmo tradurre come "Uncinetto Geomagnetico". Il termine geomagnetico è chiaro: si riferisce al campo magnetico terrestre, ma l'uncinetto, quello per ricamare, cosa c'entra col Sole? Più in là cercheremo di dare una spiegazione. L'evento in questione è sempre associato ad un flare (emissione improvvisa di luce in tutte le frequenze) di potenza alta, quindi di classe X o di classe M elevata. Uno di questi flare, di classe X1.0, prodotto alle 17:48 TU del 29 Marzo scorso è stato accompagnato appunto da un "Crochet". Si tratta, brevemente, di un brusco incremento dell'intensità di una certa componente (detta componente H) del campo magnetico della Terra, quasi contemporanea (con un inevitabile sfasamento temporale di 8 minuti, il tempo che occorre alla luce per percorrere la distanza tra noi e il Sole), che segue l'andamento del flare: cresce bruscamente e poi diminuisce mano a mano che

anche il flare attenua l'emissione di onde elettromagnetiche. E qui sta la rarità della cosa: di solito le perturbazioni del campo geomagnetico sono prodotte dalle Emissioni Coronali di Massa, tonnellate su tonnellate di plasma solare espulso dalla corona sempre in seguito a un flare, che però producono i loro effetti geomagnetici (quando si verificano le giuste condizioni) da uno a tre giorni dopo la loro nascita, in quanto viaggiano a velocità sempre impressionanti per noi umani (anche oltre i 1000 Km al secondo), ma molto, molto più piano della luce. Nel caso del Crochet invece è la luce a produrre l'effetto, provocando una crescente ionizzazione degli strati più alti dell'atmosfera terrestre, i livelli chiamati D e E della ionosfera. Questa ionizzazione, cioè un'alterazione dello stato di carica elettrica delle particelle presenti lassù, cambia di molto le proprietà della ionosfera ed in modo particolare la sua conduttività, permettendo a delle correnti elettriche di fluire molto più facilmente che non in condizioni per così dire normali. E' l'effetto di induzione magnetica prodotto da queste correnti che produce il "jump", il salto di intensità del campo magnetico della Terra. Col declinare del flare gli strati ionosferici tornano rapidamente al loro stato precedente, le correnti elettriche tornano normali e anche il campo geomagnetico torna ai livelli precedenti l'evento. Il tutto dura di solito pochi minuti (attendo ovviamente smentite dal Sole anche in questo caso) ed è illustrato nella figura seguente e relativa didascalia:



La parte superiore della figura mostra la variazione del flusso di Raggi X durante un flare di classe X2 emesso il 4 Novembre del 1997 approssimativamente alle 06:00 di Tempo Universale. Il flare è iniziato alle 05:55 TU ed ha raggiunto un picco di intensità 100 volte superiore al valore di background alle 05:58, quindi in soli tre minuti, poi ha avuto una fase discendente durata più a lungo. La parte inferiore mostra invece la "risposta" dell'intensità della componente H del campo geomagnetico (la linea più in alto), che come si vede chiaramente segue lo stesso andamento della curva di flusso del flare. I dati geomagnetici sono stati registrati al magnetometro di Canberra, in Australia, in contemporanea con i dati relativi al flare inviati a Terra da un satellite geostazionario. Le altre due linee più in basso in figura si riferiscono ad altre componenti del campo magnetico terrestre, per le quali l'effetto esiste comunque, ma è molto meno evidente.

Cortesia: IPS (www.ips.gov.au), sezione servizi Radio e Spaziali del Australian Bureau of Meteorology

Dalla figura forse si può capire il perché del termine Crochet: nel grafico dell'intensità del campo magnetico in funzione del tempo, con un po' di fantasia, si può vedere la forma di un uncino, perlomeno io la intendo così. Questi uncinetti sono rari perché possono essere osservati solo durante flare di alta potenza che raggiungono il valore di picco di emissione molto rapidamente. Inoltre sono osservati più facilmente in luoghi dove il Sole, al momento dell'evento, si trova ben alto sull'orizzonte. A conferma della natura burlona della nostra stella, concludiamo dicendo che un altro Crochet è stato osservato a San Jose, in California, alle 22:12 TU del 5 Novembre 2013, in seguito ad un flare di classe X3.3 prodotto dalla regione attiva 11890. Non tanto tempo prima del 29 Marzo di quest'anno, quindi due eventi rari separati da un intervallo di tempo non certo lunghissimo.

Nota: i numeri delle regioni attive citati sono quelli assegnati ufficialmente dal NOAA (National and Oceanic Atmospheric Administration), ente statunitense che opera in collaborazione con la USAF (United States Air Force), l'aviazione militare.

Macchie stellari

Come quelle del Sole, con le dovute differenze.

Mario Gatti

Osservatorio Solare, Istituto di Istruzione Superiore "Valceresio".
Via Roma 57 21050 Bisuschio (Varese).

Permettetemi di iniziare questo articolo prendendola un po'alla lontana, come si dice. I lettori di *Meridiana* ricorderanno certamente la foto di copertina del numero 233 di Novembre-Dicembre 2014: nell'immagine era rappresentato il Sole, con il più esteso gruppo di macchie solari che il ciclo solare in corso, il n°24, ha fatto il piacere di farci ammirare, magari per farci dimenticare per qualche giorno le sue numerose stranezze, di cui tanto si è parlato e tanto si parlerà. Questo gruppo , identificato col numero 12192 dal NOAA, merita un'occhiata più approfondita (il NOAA, National and Oceanic Atmospheric Administration, dal 1972 si occupa della numerazione progressiva delle Regioni Attive, le zone del Sole che "ospitano" le macchie. Al momento della chiusura di questo articolo il conteggio è arrivato al numero 12320. Prima dell'avvento del NOAA i gruppi di macchie erano identificati con il "Numero di Greenwich", un conteggio iniziato nel 1874). Era dal 1989 che non si vedeva una cosa così grande sul Sole: per capire quanto sia stata grande, introduciamo l'unità di misura comunemente usata in fisica solare per misurare l'estensione di un gruppo di macchie: il milionesimo di emisfero solare visibile (abbreviazioni: *mesv* in italiano, MH o MTH nel resto del mondo). Come dice il termine, ci vogliono un milione di mesv per fare una superficie pari a quella della metà della sfera solare (intesa alla fotosfera). Per usare termini meno astrusi, 1 mesv equivale a circa 3 milioni di Km quadrati e la superficie totale della Terra misura circa 167 mesv, tanto per avere un riferimento. Ebbene, la NOAA 12192 ha avuto un'estensione massima di 2750 mesv il 26 Ottobre del 2014, il che vuol dire circa 8 miliardi e 250 milioni di Km quadrati in superficie ed una lunghezza di oltre 17 diametri terrestri (poco meno di 250.000 Km). Questi numeri la collocano al 12° posto nella classifica dei gruppi più grandi osservati. Anche il famoso "gruppo di Halloween", chiamato così in quanto associato alla poderosa tempesta solare del 30-31 Ottobre del 2003 (NOAA 10486) era più piccolo: solo, si fa per dire, 2610 mesv alla sua massima estensione. Per trovare qualcosa di più grosso di NOAA 12192 bisogna andare indietro fino al mese di Novembre del 1990, quando la regione attiva NOAA 6368 presentò un'estensione massima di 3080 mesv. Per la cronaca (e almeno per il momento) in testa alla classifica c'è un gruppo apparso verso la fine di Marzo del 1947 (identificato con il numero di Greenwich 1488603), che raggiunse la sua massima estensione il giorno 8 Aprile, pari a 6132 unità. La sua area è misurata diversamente: è detta "Area di Greenwich" e per essere convertita in mesv deve essere divisa per 1,4. Un rapido calcolo ci porta a 4380 mesv. Una cosa immensa, che avrebbe potuto contenere comodamente al suo interno oltre una volta e mezza l'intera 12192. Detto per curiosità, NOAA 12192 si è presentata così grossa alla sua seconda rotazione intorno al disco solare: ne ha compiute tre prima di scomparire del tutto , ma nelle altre due si è mostrata molto meno appariscente. E' stata una delle pochissime regioni attive a fare più di un giro del Sole in questo ciclo e, stranezza tra le stranezze di cui si parlava, nonostante abbia prodotto una quantità notevolissima di flare molto energetici (classi M e X) a nessuno di questi è stata associata una Emissione Coronale di Massa (CME in inglese, *Coronal Mass Ejection*). Cosa che ha stupito non poco tutti coloro che si occupano del Sole: si vede che il suo campo magnetico, così impegnato a produrre un gruppo di tale fatta, non aveva più la forza e la voglia di

sparare nello spazio miliardi di tonnellate di plasma, che invece sono rimaste attaccate alla stella. Meglio per noi, che in caso contrario avremmo potuto avere qualche fastidio probabilmente non proprio trascurabile.

La figura 1 mostra proprio NOAA 12192 nel momento del suo massimo splendore. Tanto grande quindi, quanto innocua, per nostra fortuna.

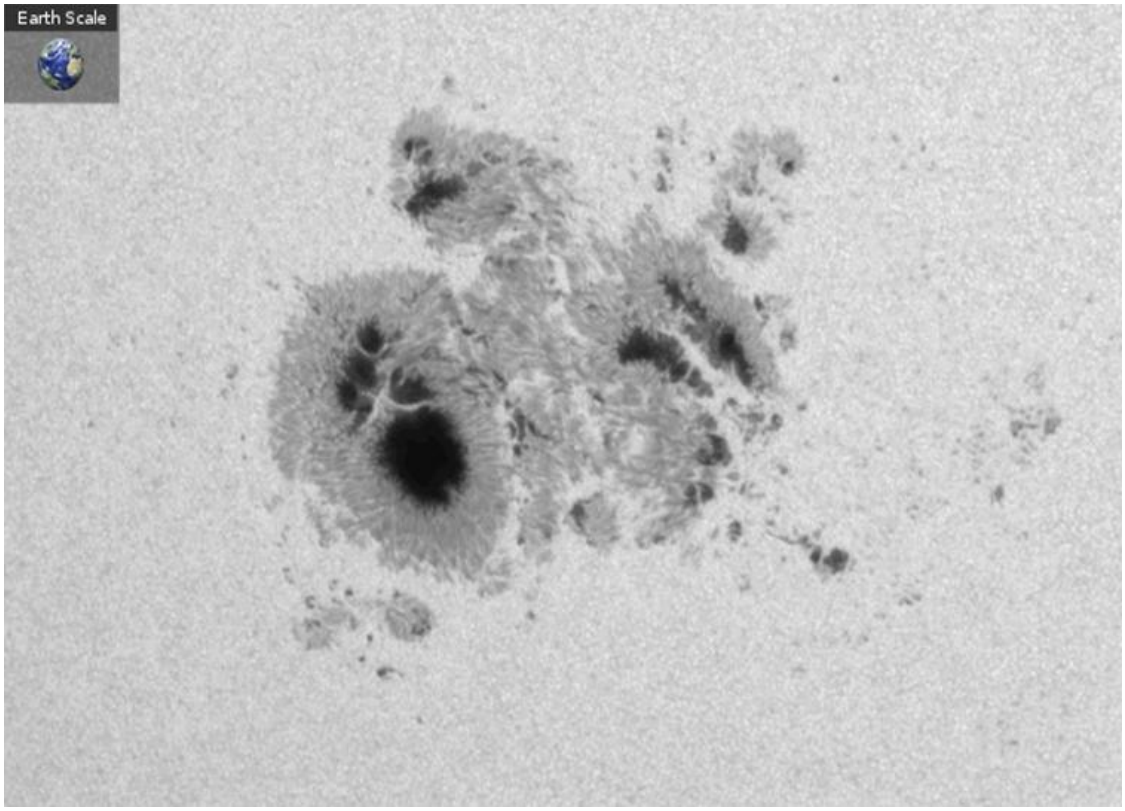


Figura 1. La Regione Attiva NOAA 12192 fotografata il giorno del raggiungimento della sua massima estensione, il 26 Ottobre 2014. Per confronto, le dimensioni della Terra sono riportate nel rettangolino in alto a sinistra. Fonte: SDO/HMI (http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi) pubblicata su STCE Newsletter 20/10/2014-26/10/2014.

Chi pensa che un tale *groupe monstre* sia stato un evento grande, quasi da non riuscire nemmeno a capire quanto, si sbaglia. O meglio, si sbaglia se pensa soltanto al Sole. Ci sono in giro nello spazio, sulle altre stelle, delle cose al cui confronto NOAA 12192 sarebbe poco più di un granello di sabbia: sono le *macchie stellari*. Quanto scritto fin qui è servito solo a fornirci una pietra di paragone, per capire meglio quello che viene mostrato alla pagina seguente in Figura 2, che fa rimanere davvero senza fiato:

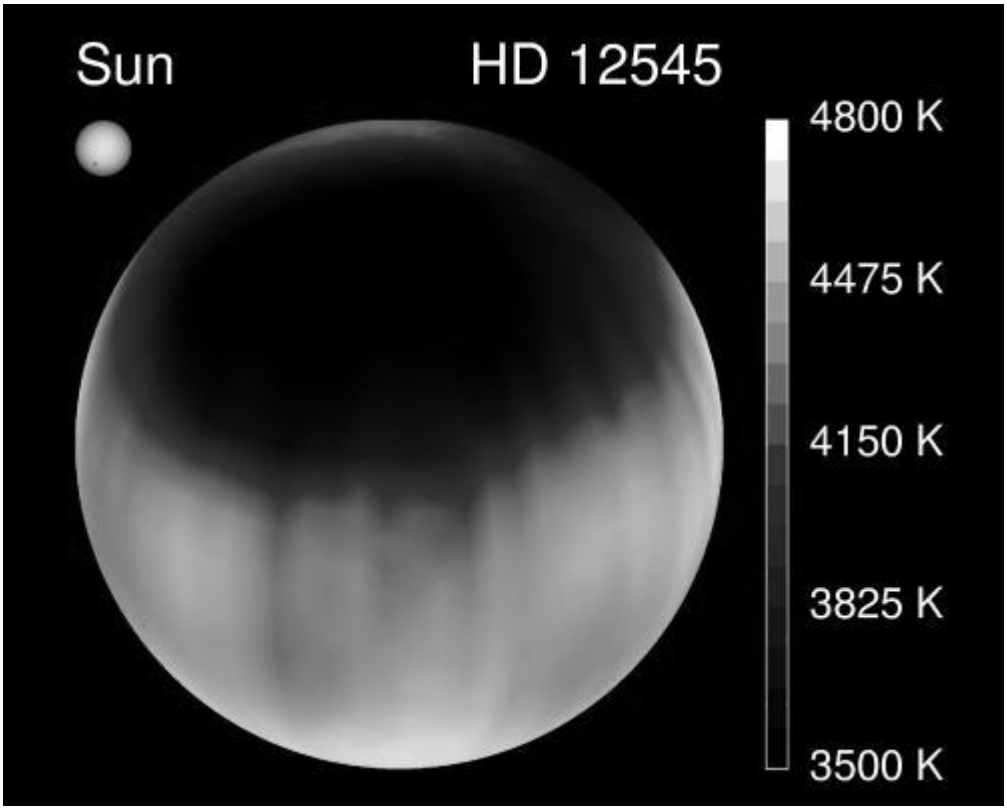


Figura 2. L'enorme macchia stellare, rilevata con la tecnica ZDI (illustrata nel testo), che nel 1999 ha ricoperto per quasi tutto l'emisfero Nord la stella gigante HD 12545 (XX Tri). In alto a sinistra sono riportate le dimensioni in scala del Sole. Questa stella, che presenta un diametro di 11.5 raggi solari, è una variabile del tipo RS CVn. Sulla destra è riportata una scala di temperature: le sfumature più scure indicano una temperatura più bassa, quelle più chiare una più alta. Notare come la macchia si estenda anche sulla calotta polare Nord, mentre quella a Sud è decisamente più calda e priva di copertura maculare. Fonte: K.G.Strassmeier, A&A, 347, 225, 1999, pubblicata su Sunspots and Starspots, di J.H.Thomas e N.O.Weiss, Cambridge Astrophysics Series 46, 2012, pag. 12.

HD 12545 (XX Trianguli) appartiene ad un tipo di stelle molto interessanti: le variabili di tipo RS Canis Venaticorum. Queste stelle sono caratterizzate da un'intensa attività e sono delle binarie strette, cioè un sistema di due stelle legate gravitazionalmente di cui una molto più massiccia ed evoluta dell'altra. La stella primaria è di tipo spettrale G (come il nostro Sole), K o M. Il tipo spettrale di una stella è dato da una serie di caratteristiche, come età, temperatura superficiale, presenza di vari elementi o molecole altamente ionizzati eccetera. Sono conosciuti, in prima approssimazione (in realtà la classificazione è molto più complessa e articolata), sette tipi spettrali, identificati dalle lettere O, B, A, F, G, K e M, seguiti da altri numeri e lettere. Per esempio il tipo spettrale del Sole è G2V. In particolare, HD 12545 è una gigante di tipo spettrale K0, approssimativamente dieci volte più grande come diametro e due volte più massiccia del Sole. Quello che ci interessa qui di HD 12545 non è tanto come è fatta, ma cosa presenta in superficie: quella immensa, enorme macchia scura che la avvolgeva, al tempo in cui è stata ricavata la sua immagine mostrata in figura, praticamente per metà, dalla calotta polare al piano equatoriale. Generata da un fortissimo magnetismo, una macchia come questa diventa sicuramente responsabile della variazione di luminosità della stella, determinata dal fatto che questa, ruotando, presenta all'osservazione la parte interessata dalla macchia e quella non interessata. Il periodo di variabilità dipenderà poi dal periodo di rotazione della stella e la sua curva di luce (si chiama così la

sua luminosità che cambia col passare del tempo) sarà influenzata dal "tempo di vita" della macchia. E' un caso estremo, chiaramente, ed anche di vecchia data: una sola, isolata, spaventosa macchia stellare. Immaginate un gruppo di macchie con dimensioni superiori a quelle dell'intero Sole, con un'estensione di 12X20 raggi solari, cioè oltre 10000 volte l'estensione del gruppo più grande finora osservato sul Sole: se una cosa del genere capitasse sulla nostra stella, come ce la passeremmo noi con un mezzo Sole praticamente nero e più freddo? Per fortuna non è mai successo niente del genere e probabilmente, per quel che ne sappiamo, non sarà certo il Sole ad offrirci mai spettacoli simili. Ovviamente, nella sua enormità, il caso di HD 12545 non è stato unico nell'Universo e sicuramente non ristretto al tipo di stelle di cui lei fa parte. Ci presenta solo un esempio di quelle che sono dette appunto macchie stellari. Nel seguito vedremo di capire meglio cosa sono, come si può capire che esistono (di certo non si vedono direttamente come quelle solari, le stelle sono troppo lontane per i nostri occhi, anche se aiutati dai telescopi), quali sono le tecniche più comunemente impiegate per farlo e quali sono le eventuali analogie e/o differenze con le ben più familiari macchie del nostro Sole.

Cominciamo con un po' di storia. Che il Sole sia una stella tra le stelle è un'idea che alloggia nella mente umana sin dai tempi degli antichi astronomi greci. Nella metà del diciassettesimo secolo la maggior parte degli astronomi, principalmente per l'influenza esercitata da Cartesio, riteneva ormai sicuro che le stelle fisse fossero dei "Soli distanti" . E' probabile che tra di loro ci fosse già qualcuno che avanzasse l'ipotesi della possibile esistenza di macchie scure sulle stelle, come quelle osservate sul Sole. Nel 1667 l'astronomo francese Ismael Boulliau (1605-1694) notò che la luminosità della stella Mira Ceti variava ciclicamente con un periodo di circa 11 mesi. "*Lo stesso Boulliau offrì una spiegazione fisica della cosa, in analogia con le macchie solari: secondo lui Mira presentava delle zone scure e la sua luminosità diminuiva regolarmente quando queste si presentavano verso l'osservatore mano a mano che la stella ruotava. Ma così come le macchie solari, anche quelle della stella subivano delle variazioni e queste davano vita alle irregolarità nella sua curva di luce*" (M. Hoskin, *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Londra, 2001, pag. 3038). L'idea fu poi ripresa e sviluppata da Bernard de Fontenelle (1657-1757) nel suo libro *Entretiens sur la Pluralité des Mondes* (1686), che divulgava soprattutto il pensiero cartesiano. Due secoli dopo, una nostra vecchia conoscenza, Rudolf Wolf, notando l'analogia tra il comportamento irregolare delle stelle variabili a lungo periodo ed il ciclo delle macchie solari propose che la causa andasse ricercata nella rotazione diversificata delle macchie stellari (J.L. Tassoul e M. Tassoul. *A Concise History of Solar and Stellar Physics*, Princeton University Press, 2004).

La storia moderna delle macchie stellari inizia con un lavoro di G.E. Kron del 1947, nel quale si riporta la scoperta di zone scure di diversa luminosità su AR Lacertae B, una stella di tipo solare, di tipo spettrale G5, facente parte di un sistema binario ad eclisse. La variabilità intrinseca della componente G5 del sistema era già stata notata in precedenza da F.B. Wood nelle sue osservazioni del 1938 e 1939, presentate poi in un suo lavoro sempre del 1947. Osservazioni sistematiche prodotte al Lick Observatory proprio nel 1947 portarono alla determinazione di curve di luce per AR Lacertae che presentavano l'aspetto comune alle binarie ad eclisse, ma con un'ulteriore piccolo, ma non trascurabile, aumento di luminosità che fu attribuito all'occultazione delle zone scure sulla stella G5 da parte della sua compagna, di tipo spettrale K0. Successivamente (1950) lo stesso Kron scoprì delle peculiarità nella stella nana ad emissione di tipo M (dMe) YY Geminorum che attribuì con tutta probabilità ad una attività fotosferica del tutto simile a quella del Sole.

Tuttavia in questi studi pionieristici le conclusioni tratte sull'esistenza delle macchie stellari non furono molto convincenti e non furono praticamente accettate dalla maggior parte della comunità degli astronomi. Negli anni '70 del secolo scorso invece la loro evidenza divenne inconfutabile in seguito soprattutto ad alcuni lavori basilari, tra i quali quello di D.S. Hall del 1972, che interpretò il complesso comportamento fotometrico della stella RS Canum Venaticorum (la capostipite della classe di variabili alla quale appartiene la nostra HD 12545). La curva di luce di questa stella presenta delle distorsioni variabili in ampiezza con andamento non uniforme nel tempo. Hall propose un modello di questo sistema secondo il quale la stella più fredda del sistema avrebbe avuto una grande estensione di macchie che misurava 30 gradi in latitudine sopra e sotto l'equatore e oltre 180 gradi in longitudine (qualcosa di molto simile a quello che ci ha offerto HD 12545 nel 1999: buon sangue non mente, visto che si tratta di stelle ben imparentate tra di loro), con un aspetto ciclico di periodo pari a 1800 cicli orbitali della stella, cioè 23,5 anni. L'anno seguente C. Torres e F. Mello dimostrarono che le variazioni in luminosità nelle nane ad emissione (le stelle dMe di cui si diceva prima) sono dovute a macchie di alcune centinaia di gradi più fredde rispetto alla temperatura superficiale delle stelle, con una copertura di una piccola parte percentuale delle stesse.

Ai nostri giorni ormai le macchie stellari sono cosa universalmente accettata ed ormai ben interpretata: sono aree nella fotosfera di una stella con temperatura minore rispetto a quella della stella stessa (come avviene sul Sole), prodotte da forti campi magnetici. Le macchie solari, quindi, altro non sono che le macchie stellari della stella che noi chiamiamo Sole. Però il Sole ci è molto vicino e questo ci permette di vedere e studiare tutte le sue macchie, comprese quelle più piccole, con dei telescopi anche di modesta dimensione. Le altre stelle, invece, sono maledettamente lontane. Ovviamente questo pone un limite inferiore alla scoperta delle loro macchie più piccole ma, senza arrivare agli estremi tipo la super macchia di HD 12545, come è possibile "osservare", non direttamente, macchie stellari di varie forme e dimensioni per così dire normali? E quali sono le loro somiglianze, o le loro diversità, rispetto alle macchie solari? Nelle prossime pagine cercheremo di dare una risposta a queste e altre domande, cercando di semplificare al massimo le risposte.

Prima di tutto alcune doverose precisazioni per quei lettori che non sono molto addentro in certe questioni, anche complesse, di fisica usate in astronomia e che sono però fondamentali per l'argomento che stiamo trattando. Le energie possibili per gli elettroni in un atomo non hanno dei valori infiniti e continui (come i numeri reali), ma costituiscono un insieme discreto, cioè solo alcuni valori di energia sono possibili. Quando un elettrone possiede una data energia si dice che occupa un orbitale atomico. Variazioni dell'energia in un atomo comportano per così dire lo spostamento degli elettroni da orbitali di una certa energia ad altri di energia diversa. Ogni qual volta ciò avviene, l'atomo può assorbire o emettere una quantità ben precisa di radiazione elettromagnetica (luce),che dipende dalla sua frequenza. Queste quantità di energia furono dette *quanti di energia* da M.Planck e poi successivamente battezzate *fotoni* da A.Einstein. Osservato con uno strumento detto spettroscopio questo fenomeno mostra quelli che si chiamano *spettri a righe* degli atomi. Una riga non è altro che l'immagine, prodotta dalla luce emessa e raccolta su uno schermo o su un dispositivo elettronico di una sottile fessura, detta fenditura, posta ad una delle estremità dello strumento. Poiché non tutte le frequenze emesse sono consentite, vista la natura non continua dei valori dell'energia degli orbitali, lo spettro di emissione di una specie atomica è costituito da una serie di righe luminose separate tra loro, che spaziano su tutto il campo della radiazione, dal visibile all'infrarosso, all'ultravioletto, ai Raggi X eccetera. Lo spettro di

assorbimento è come si dice complementare a quello di emissione: quando un atomo viene illuminato da una sorgente di luce bianca, lo spettro è costituito da zone luminose solcate da righe scure, dette di assorbimento, che si trovano alle stesse frequenze delle corrispondenti righe di emissione.

Per consuetudine, il termine *riga spettrale* (o semplicemente riga) indica quindi in spettroscopia una luce di frequenza (o se preferite di lunghezza d'onda) ben precisa e detta per questo *monocromatica*. E' possibile osservare una stella usando luce integrale (luce bianca), composta di tutte le frequenze possibili, oppure impiegare uno spettroscopio per osservare la stella in alcune frequenze (righe) ben precise. Il risultato che si ottiene in questo secondo caso è portentoso ed ha sicuramente rivoluzionato l'astronomia e l'astrofisica: poiché ogni specie atomica possiede uno spettro diverso da tutte le altre (questo vale anche per le molecole) è possibile, osservando una stella con uno spettroscopio, determinare quali elementi o molecole la compongono, utilizzando sia lo spettro di emissione che quello di assorbimento. In altre parole è possibile fare l'analisi chimica della stella senza doverne prelevare un campione e portarlo in un laboratorio, cosa ovviamente impossibile.

Se unitamente agli spettri atomici (o molecolari) si studia anche una particolare proprietà della luce, detta polarizzazione, è possibile risalire indirettamente a diverse altre proprietà fisiche della stella, come ad esempio una determinazione indiretta del suo campo magnetico (o di parti di esso), compiuta attraverso l'inversione matematica di complicate formule. Se le due tecniche vengono impiegate contemporaneamente si parla di *spettropolarimetria*: si osserva con uno spettroscopio la luce emessa da una stella (ovviamente tutto quello che stiamo dicendo vale anche e soprattutto per il Sole) e poi la si analizza con un polarimetro. Per esempio all'IRSOL di Locarno Monti opera lo ZIMPOL, ritenuto il miglior spettropolarimetro del mondo. L'indagine spettropolarimetrica del Sole si differenzia da quella fotosferica (conteggio delle macchie solari, come si fa alla Specola Solare Ticinese) per il fatto che si lavora su una porzione molto ristretta della stella e non sul suo intero disco.

Detto questo, la prima cosa da fare è indagare se, sulle altre stelle, possono essere presenti dei periodi di maggiore o minore attività ricorrenti, come i cicli solari, che deporrebbero senz'altro in favore dell'esistenza delle macchie stellari. Questo è possibile misurando il flusso di energia emesso, in un'unità di misura che coinvolge la potenza emessa per unità di tempo e di superficie quindi, in ultima analisi, qualcosa di legato alla luminosità intrinseca della stella. Nel caso del Sole questo si fa per esempio con le misure di radio flusso a 10.7 cm, di cui ho parlato in un mio precedente articolo (Meridiana n° 229) e l'unità relativa è detta sfu (solar flux unit). Per i nostri scopi andiamo invece a vedere cosa è possibile ricavare con misure del genere effettuate utilizzando lo spettro di emissione del Calcio ionizzato, in particolare con due righe conosciute come Ca II H e Ca II K, con l'aiuto della figura 3 alla pagina seguente:

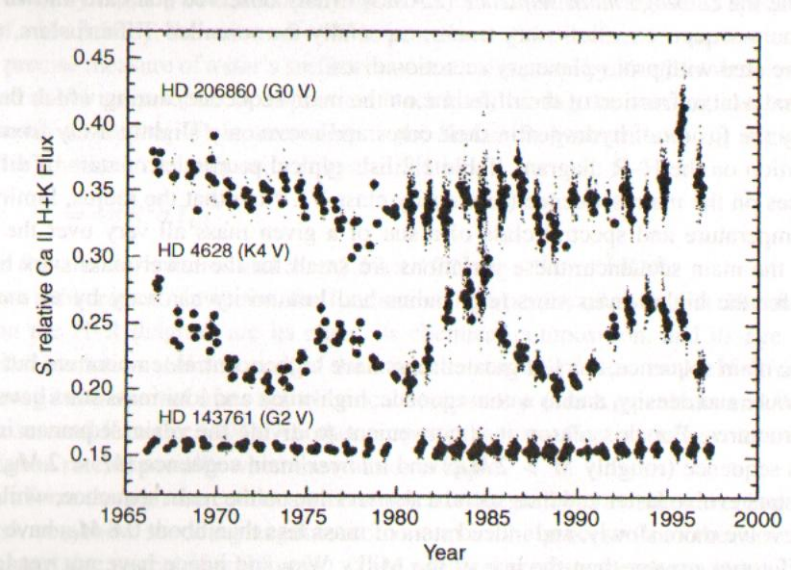


Figura 3. Grafici del flusso luminoso emesso in due righe del Calcio da tre stelle sulle quali si ritiene siano presenti delle macchie. I dettagli sono presenti nel testo. Fonte: Baliunas et al. 1998, pubblicata su Sunspots and Starspots, di J.H.Thomas e N.O.Weiss, Cambridge Astrophysics Series 46, 2012, pag.10.

Dall'esame della figura emergono tre situazioni ben distinte tra loro: nella parte centrale troviamo la stella HD 4628, di tipo spettrale K4V, che mostra un periodo di rotazione di 39 giorni (ricordiamo che quello del Sole, visto da Terra, è di 27.5 giorni circa) ed una attività ciclica quasi periodica come il Sole, con un periodo di 8.4 anni. Al contrario, la stella HD 206860, di tipo spettrale G0V, caratterizzata da un periodo di rotazione brevissimo, pari a soli 4.7 giorni, si dimostra molto più attiva (parte in alto della figura) ma con un andamento non periodico della sua attività . Infine, nella parte in basso, la stella HD 143761, di tipo spettrale G2V (lo stesso del Sole), mostra solo un livello basso e invariabile di attività. Un comportamento anomalo e inspiegabile? No. Molto probabilmente, durante gli anni di raccolta dei dati a lei relativi, la stella era entrata e forse si trova ancora in un periodo di prolungato minimo di attività, cosa fatta anche dal Sole in passato (Minimi di Maunder e Dalton, durati decine di anni). Misure come quelle illustrate qui sono dette spettrofotometriche, o anche più semplicemente solo fotometriche.

Quindi questi risultati, più molti altri dello stesso tipo e relativi ad altre stelle, ci portano a concludere che esistono situazioni di attività stellare periodica sul tipo di quella del Sole, che trovano una facile spiegazione interpretandole in termini di macchie stellari più o meno estese. Certo è che questa ipotesi deve essere confermata da altri tipi di osservazione e di misura.

A questo punto è d'obbligo parlare delle tecniche e dei tipi di indagine che permettono una rilevazione, se pur indiretta, delle macchie stellari. La più comune e diffusa è la *spettroscopia Doppler o Doppler Imaging*, impiegata con stelle a rotazione rapida. Questo metodo si basa sull'analogo ottico di un effetto fisico delle onde, più noto sicuramente a proposito delle onde sonore. A tutti sarà capitato di sentire un suono emesso da una sorgente in moto rispetto a noi che siamo fermi, o che procediamo ad una velocità più bassa: un'ambulanza, la macchina di un maleducato automobilista che ci sorpassa strombazzando con il clacson, ad esempio. E' evidente che il timbro del suono emesso da una sorgente in moto rispetto ad un ascoltatore fermo non è sempre lo stesso: diventa più acuto mano a mano che la sorgente si avvicina, poi più grave mentre

questa si allontana. E' questo l'effetto Doppler acustico: quello che sentiamo è uno spostamento verso frequenze più alte (percepite come suoni più acuti) del suono prodotto dalla sorgente in avvicinamento, seguito da uno spostamento verso frequenze più basse (suoni più gravi), di quello prodotto dalla sorgente in allontanamento. Poiché esiste una relazione tra le frequenze dei suoni emessi e la velocità della sorgente, è possibile ricavare questa velocità misurando lo "*spostamento Doppler*" delle frequenze, rispetto a quella ideale emessa dalla sorgente se fosse ferma. In ottica, con la luce, accade concettualmente la stessa cosa: quando una sorgente luminosa si avvicina ad un osservatore, costui vede una luce di frequenza maggiore rispetto a quella emessa dalla stessa sorgente se fosse ferma rispetto a lui. Al contrario, quando vede la luce di una sorgente che si allontana vede una luce di frequenza minore. Poiché i colori della luce (parliamo di quella visibile, che noi percepiamo comunemente, ma la cosa vale per qualunque frequenza della radiazione, anche se non ha più senso parlare di colori in questo caso, ma il concetto è lo stesso) dipendono dalla sua frequenza e la luce rossa è di frequenza più bassa rispetto a quella blu-viola, ecco che si parla di "spostamento verso il rosso" per la luce emessa da una sorgente che si allontana e di "spostamento verso il blu" per quella emessa da una sorgente che si avvicina all'osservatore. Che ci piaccia o no l'inglese, tutti però parlano di *red shift* e *blue shift* (*shift* significa proprio *spostamento*) nei due casi e visto che è il modo di dire comune, lo adopereremo anche noi. E' questo l'effetto Doppler ottico. Chiaramente vale la stessa cosa, (anche se questo è vero solo in prima approssimazione, in realtà l'effetto Doppler in ottica è regolato da leggi più complicate) del caso acustico: dagli spostamenti della frequenza si può risalire alla velocità della sorgente. Nel caso delle stelle variabili, o per la rilevazione delle macchie stellari (che non si vedono otticamente, sono troppo lontane) si usa proprio l'effetto Doppler applicato alla spettroscopia. Come? Concettualmente la cosa è semplice: il principio è simile a quello di una TAC usata in diagnostica medica per esempio per il cervello umano. Solo che anziché usare un dispositivo rotante che scansiona un cervello umano fermo, qui si usa una stella rotante osservata con un telescopio fisso al quale è stato applicato uno spettroscopio, che opera su una o più righe spettrali emesse dalla stella. Quando una grossa macchia stellare entra nel campo visivo del telescopio, la stella diventa più scura e ci manda meno luce, come se si stesse allontanando da noi. Quando la macchia si è spostata o, al limite, ha terminato la sua rotazione, la stella torna a produrre più luce, come se stesse tornando ad avvicinarsi a noi. Tutto ciò si traduce in spostamenti Doppler delle righe spettrali osservate. In modo non certo semplice è possibile da queste asimmetrie delle righe risalire, grazie al periodo di rotazione della stella ed al tempo di durata degli spostamenti in frequenza, alla forma e alla dimensione della macchie. Aggiungendo poi un altro ingrediente fondamentale si possono ricavare addirittura delle mappe che mostrano la presenza, la posizione e gli spostamenti delle macchie stellari. Questo ingrediente è *l'effetto Zeeman*. Anche qui non si tratta di una cosa proprio semplice ma, ridotto ai minimi termini, questo effetto consiste nell'osservazione di frequenze aggiuntive a quella principale di una riga spettrale, quando questa viene emessa da una sorgente immersa in una campo magnetico . Siccome le stelle sono delle immense macchine magnetiche, l'effetto Zeeman (nelle sue varianti dette normale e anomala) è conosciutissimo e super impiegato in astrofisica. Dalle frequenze delle righe aggiuntive emesse per effetto Zeeman è possibile risalire in modo indiretto alle proprietà del campo magnetico. Poiché questo a sua volta determina, sottraendo calore al plasma stellare in moto convettivo sotto la fotosfera, la nascita delle macchie, fate due più due ed ecco che si può arrivare ad ottenere delle "mappe magnetiche" delle stelle con relative macchie. Un esempio famoso in questo senso, offertoci da una stella a sua volta famosa per la rapidità con la quale ruota, è riportato in figura 4:

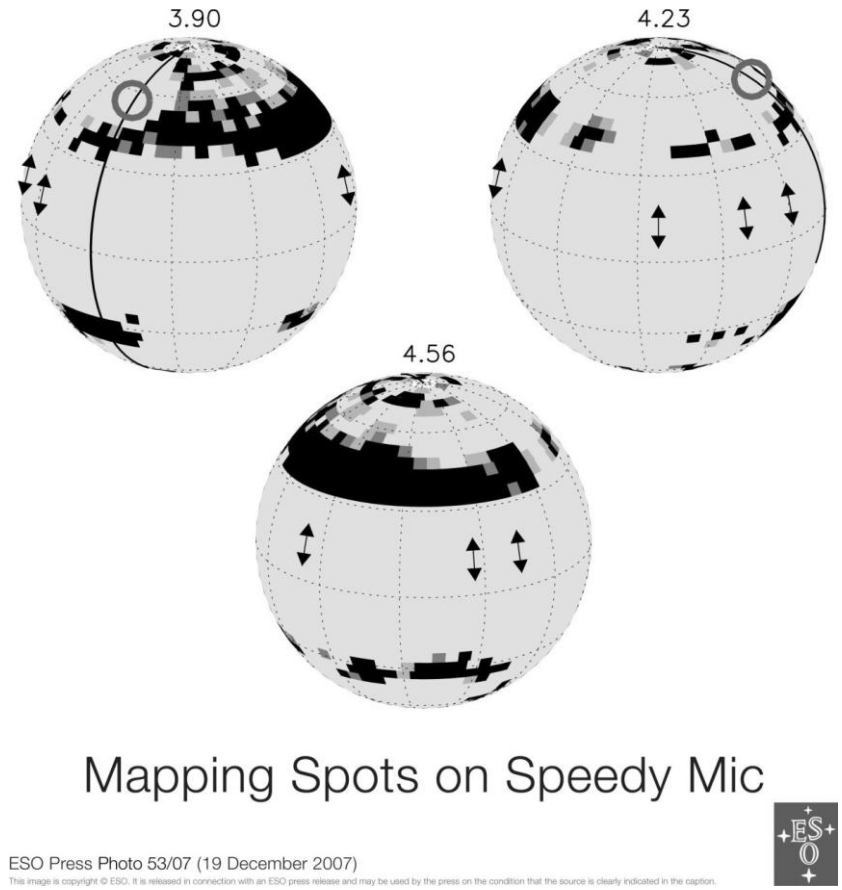


Figura 4. Mappa magnetica, ottenuta con la tecnica del Zeeman-Doppler Imaging (si veda il testo), della stella BO Microscopii posta a circa 170 anni luce dal Sole, che mostra la evidente copertura di macchie stellari. Questa stella ruota su se stessa con una rapidità impressionante: ha un periodo di 9 ore e 7 minuti. Questa caratteristica le è valsa l'appellativo di "Speedy", cioè "la veloce". Speedy Mic è anche un esempio di flare-star, un tipo di variabili che possono presentare un improvviso e imprevedibile aumento di luminosità della durata di alcuni minuti, interpretato con il rilascio di energia analogo a quello dei flare solari, che può però raggiungere su alcune stelle anche due ordini di grandezza maggiore (superflares) rispetto al Sole. Fonte: ESO.

L'esempio di Speedy Mic non è che uno dei tanti ottenuti con la tecnica detta *Zeeman-Doppler Imaging*, spesso abbreviata in ZDI. Oltre a questa e alle indagini spettrofotometriche, esiste un'altra tecnica, impiegata questa volta per stelle a rotazione più lenta, per le quali la ZDI presenterebbe problemi di tempi di osservazione troppo lunghi. Il suo nome anglosassone è *Line Depht Ratio*, che si potrebbe tradurre con "rapporto di profondità di riga" ed è conosciuta con la sigla LDR. Prima di illustrarla brevemente, cerchiamo di capire cosa si intende per *line depht* o profondità di linea. Una riga (o linea) spettrale è tale solo in teoria, nel senso che il suo aspetto, registrato e messo su grafico da un sistema computerizzato, per esempio, non è quello di una linea ideale, piuttosto quello di una specie di curva a campana più o meno alta, larga e distorta. Quando l'aspetto è quello di una campana quasi perfetta si dice che la linea spettrale ha la forma di una curva di Gauss o Gaussiana. Matematicamente la profondità di una linea (che ha delle analogie con il concetto di profondità ottica usato per caratterizzare la trasparenza e l'opacità di un mezzo attraversato dalla luce) è il rapporto tra la differenza tra il flusso di luce continua, diminuito del valore di flusso della linea stessa, e il flusso continuo. Per dirla in parole più semplici, tanto più una linea spettrale appare a forma di campana stretta ed allungata tanto più la sua profondità ottica

diminuisce e si avvicina allo zero. Al contrario, se la forma è quella di una campana bassa ed allargata la profondità della linea si avvicina al valore 1. Qualcuno potrebbe osservare che questa definizione è diversa da altre riportate in fisica. E' vero, ce ne'è più di una, ma concettualmente sono tutte identiche. La profondità di linea (e questa è la cosa importante) è un parametro che dipende inoltre dalla temperatura della sorgente emittente, in modo diverso per righe diverse: ve ne sono alcune per le quali la profondità è per così dire più sensibile alla temperatura, altre per le quali lo è meno. Ciò premesso, vediamo in cosa consiste la tecnica LDR usata per lo studio delle macchie stellari. La sua caratteristica principale è quella di scoprire eventuali macchie non in base alla diminuzione di luminosità intrinseca della stella (spettrofotometria) o agli spostamenti Doppler delle righe (ZDI), ma grazie alla misura di variazione della temperatura superficiale della stessa dovuta alle macchie, con una precisione di più o meno 10K, che è notevole, se si pensa che si stanno studiando oggetti lontanissimi. In breve e semplificando al massimo, si procede così: la stella viene osservata in due righe spettrali, una poco sensibile ed un più sensibile alla temperatura in termini di profondità. Se poniamo, per esempio, che la presenza di una macchia produca una diminuzione del 10% di luminosità nel fondo continuo di radiazione (luce integrata), le due righe, se fossero identicamente sensibili alla temperatura, mostrerebbero una variazione di profondità diversa, ma il rapporto (*ratio*) tra le due variazioni rimarrebbe costante rispetto a quello ottenuto se la macchia non fosse presente. Ma il fatto che una delle due linee spettrali mostri una diversa variazione di profondità rispetto all'altra per la stessa variazione di temperatura fa sì che il rapporto cambi. La variazione di rapporto dipende dal calo di temperatura e dalla percentuale di superficie stellare ricoperta dalla macchia. La misura del *line depht ratio* permette quindi di risalire a queste caratteristiche, cioè alla forma, alle dimensioni e alla temperatura della macchia.

Esiste anche un'altra tecnica di indagine, detta Astrosismologia, ma non è pane per i miei denti, troppo complicata, quindi mi limito a riportarne il nome. Dirò solo che va alla ricerca di macchie stellari studiando le oscillazioni globali di una stella (un po' come quelle di un budino dentro una ciotola che viene fatta oscillare), le loro frequenze e quelli che sono detti modi di vibrazione. Questa roba si usa anche per il Sole, si chiama Eliosismologia e permette di studiare l'interno della nostra stella oltre che l'aspetto della parte nascosta del suo disco (ad esempio macchie del lato nascosto). Il termine "sismo" deriva dall'analogia di queste oscillazioni con le onde d'urto prodotte dai terremoti sulla Terra, con la differenza che un sisma terrestre ha un epicentro e rimane localizzato in una certa zona del pianeta (un terremoto, per quanto forte sia, non è avvertibile su tutta la Terra), mentre nel caso delle stelle le onde si propagano internamente a tutto l'astro ed hanno una natura diversa, sono oscillazioni del plasma immerso nel campo magnetico stellare. Per chi fosse interessato a saperne di più, almeno relativamente all'Eliosismologia (quindi limitandosi al caso del Sole, che poi è il laboratorio perfetto per studiare anche le altre stelle), consiglio l'ottima monografia "*Advances in Global and Local Helioseismology: an Introductory Review*" di Alexander G. Kosovischev, reperibile su arxiv.org, (arXiv:1103.1707v1 del 9/03/2011). C'è un sacco di matematica complicata da digerire, ma la trattazione è veramente completa ed esauriente.

Giunti a questo punto conviene iniziare a tirare un po' le fila del discorso, parlando di quelle che possono essere le somiglianze (o discrepanze) tra le macchie stellari e le più familiari, nostre, per così dire, macchie solari. Prima però , con l'aiuto della figura 5, vediamo alcune caratteristiche, spiegate nella relativa didascalia, di stelle che presentano macchie e sono state ben studiate con le tecniche illustrate in precedenza:

Star	Type	Spectral class	T_{eff} (K)	P_{rot} (days)	$v \sin i$ (km s^{-1})
Sun	Single	G2 V	5780	25.4	2.0
EK Dra	Single	G1.5 V	5870	2.60	17.3
HD 171488	Single	G0 V	5800	1.337	38
AB Dor	Single	K0 V	5250	0.5148	91
HR 1099	RS CVn	K2 V	4800	2.84	41
HD 12545	RS CVn	K0 III	4750	24.0	21
II Peg	RS CVn	K2 IV	4600	6.72	23
FK Com	FK Com	G4 III	5080	2.40	155
HD 199178	FK Com	G5 III–IV	5450	3.32	71.5
BY Dra	BY Dra	K7 IV–V	4100	3.8	7.4
AG Dor	BY Dra	K0 V	4900	2.56	18
V410 Tau	T Tau	K4 IV	4400	1.872	77
HDE 283572	T Tau	G8 IV–V	5500	1.55	80

Figura 5. Proprietà di alcune stelle con macchie indagate con le tecniche descrittte nel testo. Nelle colonne, da sinistra a destra, sono riportati: la sigla identificativa della stella, il tipo, se singola o binaria variabile, la classe spettrale, la temperatura superficiale, il periodo di rotazione (in giorni) e la velocità angolare equatoriale misurata per linea di vista dell'osservatore.Fonte: Sunspots and Starspots, di J.H.Thomas e N.O.Weiss, Cambridge Astrophysics Series 46, 2012, pag.169.

Come si può notare, ce n'è per tutti i gusti. Personalmente, ritengo che essere giunti ad ottenere tali risultati sia una delle più grandi conquiste del pensiero scientifico e della tecnologia dell'uomo, usati per scopi intelligenti, il che purtroppo non sempre avviene. Lasciando da parte la filosofia, i più interessati possono trovare i dettagli fini delle stelle riportate in tabella nel bellissimo libro "*Sunspots and Starspots*" di John H. Thomas e Nigel O. Weiss, Cambridge Astrophysics Series 46, pagine 168-177.

Per quanto riguarda il confronto tra le macchie del Sole e quelle di altre stelle, premesso che diamo ormai per sicura la loro origine comune, cioè un raffreddamento locale della fotosfera prodotto dal campo magnetico, una prima differenza balza subito all'occhio: mentre le macchie solari sono confinate in una zona (detta appunto delle macchie) che si estende in latitudine eliografica per più o meno 30°, sono noti molti casi (e la "stella pilota" di questo articolo, HD 12545, ne è un esempio lampante) di stelle che presentano macchie molto in prossimità delle zone polari. Questa per il Sole è cosa tanto rara come l'acqua nel deserto: in un ciclo solare le macchie oltre i 40° di longitudine si contano quasi sulle dita di una mano. In quello in corso poi non se ne parla nemmeno. Sono state rare addirittura quelle oltre i 25°, figuriamoci le altre. I tipi di stelle variabili che presentano la maggiore tendenza a mostrare macchie polari sono le RS CVn e le T Tauri. Però non tutte le stelle a rapida rotazione si comportano così: ad esempio PW Andromedae (HD 1405) , una giovane stella con un periodo di rotazione di 1,754 giorni, mostra una distribuzione di macchie stellari sul tipo di quelle del Sole , tra i 40° di latitudine sia a Nord che a Sud. Queste macchie, però a differenza di quelle solari, hanno una estensione da 10 a 100 volte maggiore. Questa stella ci offre l'opportunità di introdurre un'altra differenza sostanziale tra macchie solari e stellari: quella delle dimensioni. Le macchie stellari sembrerebbero essere molto, ma molto più grandi (in rapporto alle dimensioni della stella che le ospita) relativamente a quelle del Sole. Qui però bisogna stare attenti: sarà davvero

così, o i nostri metodi attuali di osservazione non riescono a distinguere tra macchie e gruppi? Mi spiego meglio: per le macchie solari non ci sono dubbi. Chi le osserva sa distinguere benissimo tra una macchia singola (magari piccolina, ma a volte molto grande) dotata spesso, ma non sempre, di una bella penombra ed un grande, esteso gruppo che raccoglie molte macchie. Ma la cosa riesce perché il Sole e le sue macchie sono qui, sulla porta di casa nostra. Chi può dire che una super macchia come quella di HD 12545 sia davvero tale, cioè singola, o non sia piuttosto un grande gruppo che le nostre tecniche di indagine non riescono a risolvere e separare in macchie più piccole? Lo stesso discorso vale per le altre macchie stellari. Alcune sono davvero enormi, ma lo saranno davvero o siamo noi che non riusciamo a capirlo? Alla fine dell'articolo troverete un riferimento bibliografico ad un recente lavoro che, fra le altre cose, tenta di fare luce su questo problema, che è il vero problema aperto sulla natura delle "*starspots*". Altra questione: i tempi di vita. Sul Sole un gruppo di macchie raramente "vive" oltre una rotazione solare (detta rotazione di Carrington). Sono ben noti i casi di "regioni di ritorno" ma spesso, ai loro passaggi successivi sulla parte visibile del disco solare, queste si presentano molto meno strutturate e con meno macchie e anche meno facilmente interpretabili dal punto di vista delle loro caratteristiche magnetiche (conosciute come classificazione di Hale o di Mount Wilson). Sulle altre stelle le cose possono andare diversamente: la tecnica ZDI, ad esempio, ha permesso di individuare gruppi di macchie stellari con tempi di vita molto più lunghi: da alcuni mesi fino addirittura oltre i sei anni (Henry *et al*. 1995). Una grande macchia polare sulla stella HR 1099, una variabile di tipo RS CVn, è stata osservata (con cadenza di almeno due osservazioni per anno) per oltre 15 anni, sebbene abbia mostrato delle variazioni di forma durante il periodo (Vogt *et al*. 1999, Donati 1999). Fino dove arrivano quindi le analogie e le differenze tra il Sole e le altre stelle, dal punto di vista delle macchie? Possono i nostri modelli che spiegano la natura delle macchie solari essere semplicemente riadattati, riscalati, per così dire ed essere applicati alla produzione di un modello adatto alle molto più grandi macchie stellari? Le grandi macchie rivelate dalle tecniche illustrate in precedenza sono delle vere singole macchie o gruppi di macchie non risolti nelle macchie che li compongono? Tutte questioni che al momento non trovano una risposta. Bisogna avere pazienza, prima o poi arriverà, con le stelle i tempi sono sempre lunghi, vista anche la scala temporale delle loro vite.

Ci stiamo avviando alla conclusione del nostro viaggio sulle stelle giaguaro (a me piace chiamarle così, quando le immagino tutte macchiate come i bellissimi felini terrestri). Prima però meritano la nostra attenzione ancora un paio di cose interessanti: i cicli flip-flop e le eventuali ripercussioni della presenza delle macchie stellari sulla scoperta degli esopianeti, quelli che orbitano attorno a stelle diverse dal Sole. Cosa diavolo sono questi cicli flip-flop? Presto detto: su moltissime stelle è stato possibile osservare (si vedano la figura 6 alla pagina seguente e la relativa didascalia) una specie di spostamento in longitudine dell'estensione e del numero delle macchie stellari o, se preferite un termine più "solare", delle regioni attive. Nella nomenclatura anglosassone, quando ci si interessa alle variazioni in longitudine stellare, quindi nel senso Est-Ovest, delle regioni attive, queste vengono identificate con il termine *active longitudes*.

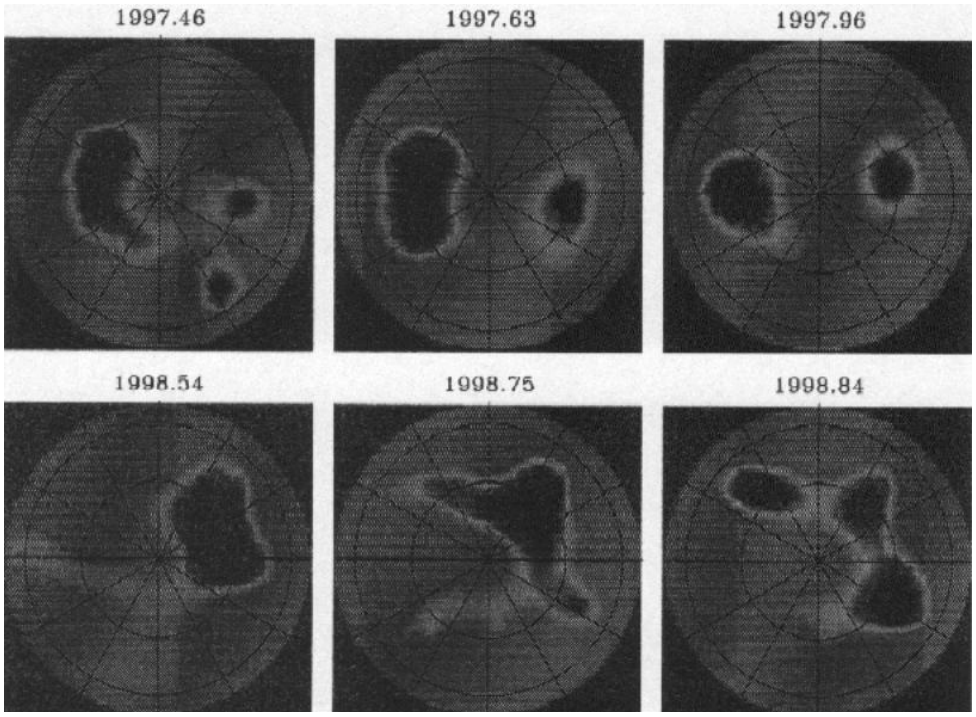


Figura 6. Immagini doppler in proiezione polare della stella II Peg, di tipo RS CVn, che mostrano un ciclo flip-flop avvenuto tra la fine del 1997 a la metà del 1998. Fonte: Beryugina et al. 1999, pubblicata su Starspots: A Key to the stellarDynamo, di S.V.Berdyugina, Living Rev. in Solar Phys., 2, (2005), 8, (http://www.livingreviews.org).

Ebbene, queste *active longitudes* mostrano spesso delle asimmetrie, delle differenze tra l'emisfero Est e quello Ovest della stella, nel senso che se tendono a ridursi da una parte allora aumentano su quella opposta, e viceversa. Questo comportamento non è casuale, ma presenta delle periodicità ben definite, diverse da stella a stella, che qualcuno si è divertito a battezzare ciclo flip-flop. Il rapporto, in termini di periodicità, dei cicli flip-flop con quelli delle macchie stellari è diverso tra le stelle binarie e quelle singole. Nelle variabili RS CVn, che mostrano entrambi i tipi di ciclo, il flip-flop ha una durata doppia rispetto a quello delle macchie, mentre nelle stelle singole giovani è di circa 3-4 volte più breve. Anche il Sole ha il suo bravo ciclo flip-flop: l'attività relativa alle macchie di maggiori dimensioni si alterna in longitudine, ma in modo diverso nell'emisfero nord piuttosto che in quello sud. La durata media di un flip-flop solare è di 3.8 anni nell' emisfero nord e di 3.65 anni in quello sud (Berdyugina e Usoskin, 2003). Inoltre è stato proposto che questa asimmetria tra nord e sud oscilli a sua volta su una scala temporale dell'ordine del centinaio di anni. Alcune tra le altre stelle per le quali è emersa l'evidenza di un ciclo flip-flop sono EI Eri, IM Peg, HD 37824 tra le binarie e Ab Dor, EK Dra e FK Com tra quelle singole.

Poiché gli esopianeti vengono ricercati (e trovati) con tecniche fotometriche, la presenza di macchie stellari, che si possono individuare nello stesso modo, potrebbe ostacolare la loro scoperta ed alterare le loro proprietà. Uno studio in tal senso è stato proposto, per la stella chiamata Kepler 9, da C. Vilela e collaboratori, nell'articolo "*Stellar Magnetism and starspots: the implications for exoplanets*", anche questo reperibile su arxiv.org (arXiv:1310.0962v1 del 3/03/2013).

Proprio per finire, per i lettori più esigenti ed interessati, segnalo un recente lavoro di N.Afram e S.V. Berdyugina, "*Molecules as magnetic probes of starspots*" (A&A 576, A34, 2015), che propone metodi di indagine sulle macchie stellari che utilizzano gli spettri di alcune molecole, quali MgH,

TiO, CaH, e FeH. Le macchie sono state studiate anche dal punto di vista magnetico attraverso la misura dei parametri di Stokes (delle cose matematiche complicate che servono a descrivere lo stato di polarizzazione della luce) e per diverse stelle, di tipo spettrale M, K e G, è stato possibile stabilire accuratamente il rapporto tra la loro temperatura fotosferica e quella delle macchie. Per le stelle di tipo G, quelle più simili al Sole, si va da un rapporto 5500K/3800K ad un rapporto 6000K/4800K.

***Nota finale**: questo articolo è stato volutamente scritto con un taglio divulgativo come è nello stile di questa rivista, tentando di semplificare, si spera senza banalizzare, delle questioni spesso complicate. Se qualche lettore rilevasse delle imprecisioni o inesattezze nel testo, è invitato a segnalarle all'autore, inviando un messaggio a mariogatti@solarspots.net. Eventuali correzioni o aggiunte potranno essere pubblicate nei prossimi numeri.*