

**TESINA PER L'ESAME DI STATO  
A.S. 2016/2017**

*Tecniche Astronomiche per la Fisica Solare*

di Arianna Codato

Il presente contributo, elaborato dalla **studentessa Arianna Codato** dei Licei Stefanini di Mestre (VE), è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo **"Stage a Tor Vergata"** - promosso dal Piano nazionale Lauree Scientifiche e tenuto presso i laboratori della Macroarea di Scienze MFN dell'**Università degli Studi di Roma Tor Vergata** in due fasi:

- Stage Estivo dal 13 al 17 Giugno 2016;
- Stage Invernale dal 6 al 10 Febbraio 2017.

Le attività didattiche previste nel Programma dello Stage sono state realizzate in cinque gruppi di ricerca, guidati da docenti dell'Università di Roma Tor Vergata.

**Il responsabile scientifico del Modulo "Tecniche Astronomiche per la Fisica Solare"**

Prof. Francesco Berrilli

.....



**Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"**

Prof. Nicola Vittorio

.....



# **IL SOLE E L'INTERAZIONE SOLE-TERRA**



**Codato Arianna  
5PA  
Licei Stefanini, Mestre, VE  
A.S. 2016/2017**



# INDICE

---

<b>Introduzione.....</b>	<b>2</b>
<b>La stella.....</b>	<b>3</b>
<b>La struttura.....</b>	<b>4</b>
Il nucleo.....	4
La zona radiativa.....	5
Lo strato invertente.....	5
La zona convettiva.....	6
La fotosfera.....	6
La cromosfera.....	6
La zona di transizione.....	7
La corona solare.....	7
<b>L'attività solare.....</b>	<b>8</b>
Le macchie solare.....	8
I flares o brillamenti.....	9
CME.....	10
Il vento solare.....	10
<b>L'interazione Sole-Terra.....</b>	<b>11</b>
Le aurore.....	12
Le tempeste magnetiche.....	12
Implicazioni tecnologiche.....	13
<b>Conclusioni.....</b>	<b>14</b>
<b>Bibliografia e Sitografia.....</b>	<b>15</b>



## **Introduzione**

---

Questo approfondimento nasce da una esperienza di Stage presso l'Università di Roma Tor Vergata che ho svolto l'estate scorsa presso il modulo di Tecniche per la Fisica Solare.

Le lezioni di quella settimana hanno toccato diversi argomenti: primi semplici rudimenti di ottica, storia dei telescopi, vantaggi e differenze tra le loro diverse montature e i loro diversi fuochi, fino poi ad arrivare ad un basilare studio del Sole, oggetto di quelle che sono state anche le nostre osservazioni pratiche.

Proprio in merito a ciò, mi ha colpito come il Sole sia immensamente diverso da com'è rappresentato nell'immaginario comune e soprattutto come esso sia influente nelle nostre vite e non solo come fonte di luce.

La nostra stella è infatti il centro di complesse attività fisiche e chimiche che si influenzano a vicenda e influenzano ciò che gli sta attorno, quasi come un essere vivente: come ogni essere vivente entra in contatto con gli altri e con l'ambiente che lo ospita, anche il Sole entra in contatto con il complesso universo che lo circonda influenzandone gli equilibri.

Sono questi equilibri, e soprattutto quelli stabiliti con il nostro pianeta, che mi hanno interessato maggiormente e che ho cercato di analizzare e spiegare attraverso un percorso che muova dall'idea del Sole come "semplice" stella, passando per la schedatura della sua struttura e l'analisi dei principali fenomeni che permettono lo studio del suo livello di attività, che è ciò che incide su tali equilibri.



## La stella

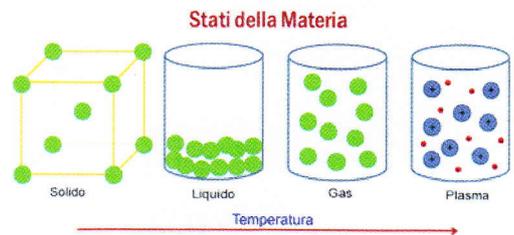
Il Sole è una stella di classe G\* di massa indeterminata e destinata a vivere 10 miliardi di anni (di cui 5 già vissuti).

*\*classe determinata in base alla sua temperatura superficiale, grazie all'analisi del suo spettro.*

In quanto stella, il Sole è:

**“una successione di strati di plasma di diversa trasparenza (densità) a simmetria sferica, che genera energia.”**

- **Plasma:** in fisica viene considerato il quarto stato della materia. Il plasma è un gas ionizzato fatto di elettroni liberi e atomi che li hanno perduti. Perché vi sia il passaggio di stato è necessaria una gran quantità di energia.



Disposizione delle molecole e degli atomi nei quattro stati della materia

- Si parla di **simmetria sferica**, e non di sfera, in quanto non ha un limite definito entro cui racchiude tutto il suo plasma, ma è composto appunto da strati di gas, che vanno “sfumando verso l'esterno”.

Tale struttura sferica è dovuta al contrapporsi di due forze:

-la *forza gravitazionale*, che tende a far collassare i gas verso il centro

-la *forza prodotta dal processo di radiazione*, innescato proprio dalla forza gravitazionale, che spinge i gas ad espandersi verso l'esterno.

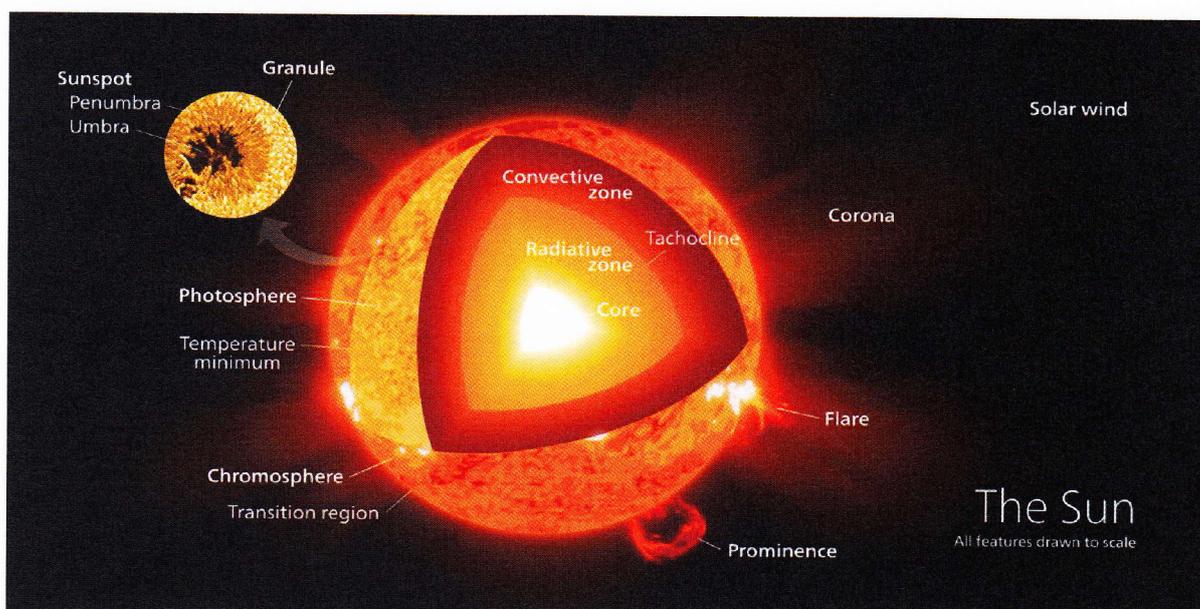
- **Genera energia:** dal 1600 ad oggi si sono susseguite diverse teorie che spiegassero la generazione dell'energia all'interno della stella:
  - Combustione, per cui il Sole sarebbe stato come un'enorme fornace;
  - Trasformazione di energia meccanica, per cui il sole avrebbe prodotto energia trasformando in calore l'energia meccanica ceduta da meteoriti, comete e bolidi che cadevano sulla superficie della stella;
  - Contrazione gravitazionale, per cui il sole avrebbe prodotto energia trasformando in calore dell'energia cinetica fornita dalla stessa stella che precipitava verso il suo centro;
  - Fusione, per cui nel nucleo due protoni collidono e vanno a formare un nucleo di deuterio, il deuterio collide poi con un altro protone formando un nucleo di trizio che scontrandosi con un altro nucleo di trizio forma un nucleo di elio con rilascio di due protoni e energia.

## La struttura

il Sole è convenzionalmente diviso in zone, ognuna delle quali è caratterizzata da differenti processi fisici al suo interno:

- Il nucleo centrale, o core,
- La zona radiativa
- Lo strato invertente
- La zona convettiva
- La fotosfera } Superficie solare
- La cromosfera } Atmosfera solare
- La zona di transizione
- La corona solare

*I termini "superficie" e "atmosfera" fanno riferimento al Sole come ci appare e non a come realmente è, in virtù del fatto che come abbiamo detto prima il Sole non ha un limite definito (una superficie appunto) entro cui contiene tutto il suo plasma.*



Rappresentazione grafica degli stati che compongono il sole e alcuni suoi elementi

### IL NUCLEO CENTRALE

Raggio: 0,2 raggi solari	Temperatura: 15.000.000°C	Densità: 160.000 kg/m <sup>3</sup>
--------------------------	---------------------------	------------------------------------

Qui avvengono le reazioni termonucleari che producono energia: ogni secondo 5 milioni di atomi di idrogeno (H<sub>2</sub>) vengono fusi in 4,5 milioni di atomi di elio (He), il surplus è energia, luce.

Tali reazioni sono possibili grazie alle elevate temperature e all'elevata densità che permettono una frequente collisione atomica e il superamento della barriera elettrica coulombiana da parte degli ioni H<sup>+</sup>.

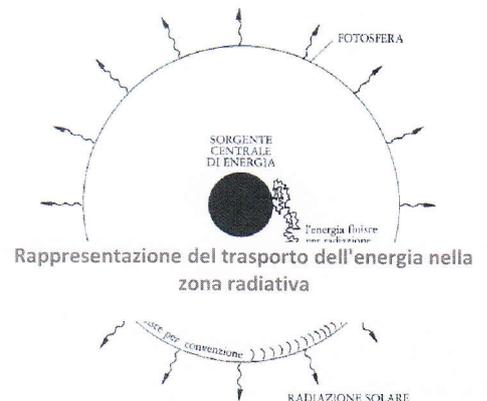


## LA ZONA RADIATIVA

Da 0,2 a 0,713 raggi solari	Temperatura: 7.5000.000°C	Densità: 20 g/cm <sup>3</sup>
-----------------------------	---------------------------	-------------------------------

L'energia passa per irraggiamento. L'energia quindi viene trasferita grazie a processi di interazione con gli stomi circostanti.

Gli atomi assorbono energia e la riemettono ad altre lunghezze d'onda: i fotoni vengono assorbiti e riemessi in tutte le direzioni per questo motivo infatti un fotone trasportante energia ci impiega circa 1.000.000 anni per attraversare tutta la zona radiativa.



## LA ZONA INVERTENTE-TACHOCLINE

Separa la stella dalla zona in cui si comporta come un corpo solido da quella in cui si comporta come un fluido.

Per questo motivo si ritiene si generino qui gli intensi campi magnetici del Sole grazie al meccanismo della **dinamo solare**.

- **la dinamo solare**: fenomeno che genera il campo magnetico.

Si crede che questo venga attivato da una corrente elettrica che si crea a causa della diversa rotazione del Sole (più veloce all'equatore rispetto ai lati per la zona convettiva e viceversa per la zona radiativa).

L'inversione della polarità del campo risulterebbe dall'inversione delle due velocità.

*Immaginiamo un fiume che scorre: la sua corrente sarà più rapida al centro e più lenta vicino alle rive. Così come nel fiume per questa differenza di velocità, ogni tanto si formano dei mulinelli di acqua o dei piccoli gorgi; così anche nel sole si formano questi mulinelli.*

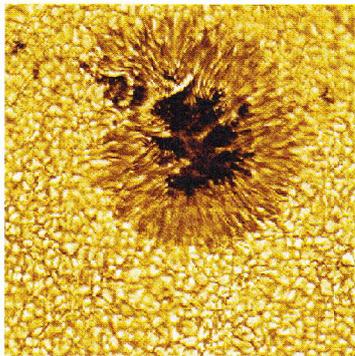
## LA ZONA CONVETTIVA

da 0,713 a 1,0 raggi solari	Temperatura: da 2.000.000° C a 6.000° C	Densità: $2 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^3$
-----------------------------	--------------------------------------------	--------------------------------------------

Alcuni ioni si legano ad alcuni elettroni, per questo motivo il trasferimento dell'energia non è più di tipo radiativo ma diventa di tipo convettivo. Il trasporto convettivo è molto più rapido di quello radiativo e coinvolge il rimescolamento di enormi colonne di plasma.

## LA FOTOSFERA

Spessa 400km	Temperatura: da 6.000° C a 4.400° C	Densità: $10^{-6} \text{ kg/m}^3$
--------------	----------------------------------------	-----------------------------------



Dettaglio della fotosfera che evidenzia i granuli e la struttura di una macchia solare con la sua ombra e penombra

Il plasma è quasi allo stato della materia che ci circonda sulla Terra, proprio per questo motivo la fotosfera emette onde di luce bianca. Gli elettroni legati ai nuclei, eccitati dalla gran quantità di energia si muovono tra i diversi livelli energetici emettendo fotoni di luce visibile.

Si presenta granulosa a causa delle celle convettive sottostanti.

Il trasporto di energia è nuovamente di tipo radiativo.

Sulla fotosfera sono visibili le **macchie solari**, indici dell'attività solare.

## LA CROMOSFERA

Spessore: 5.000 km	Temperatura: da 6.000°C a circa 20.000°C	Densità: $10^{-9} \text{ kg/m}^3$
--------------------	---------------------------------------------	-----------------------------------

È ricoperta di filamenti che si formano ai confini tra due regioni con polarità magnetica opposta, lungo i bordi dei supergranuli (celle convettive dalle grandi dimensioni) e che possono scomparire o improvvisamente sollevarsi verso l'alto diventando protuberanze, fonti delle eruzioni di plasma, assicurando il trasferimento di materia tra cromosfera e corona.

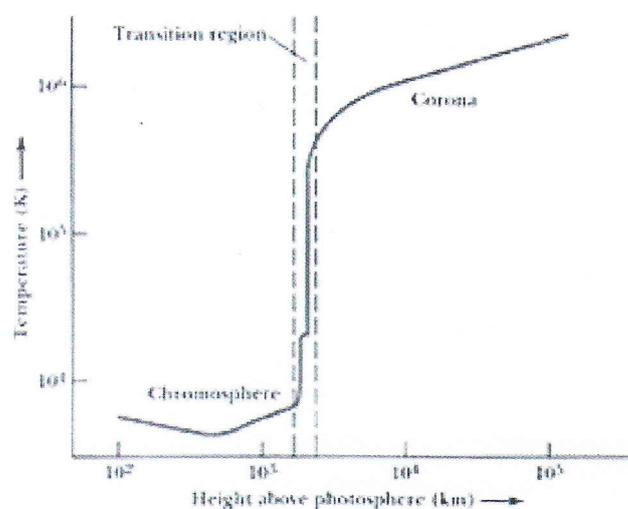


## LA ZONA DI TRANSIZIONE

In questa zona spessa 30 km si verifica la rapida variazione di temperatura che si registra tra cromosfera e corona.

Questo drastico cambiamento sembra scontrarsi con il secondo principio della termodinamica per cui il calore non può passare spontaneamente da un corpo più freddo a uno più caldo.

Probabilmente quindi l'aumento di temperatura non è dovuto ad un trasferimento di energia termica ma piuttosto è dovuto a un trasferimento diretto di energia meccanica. Secondo le teorie attuali l'energia meccanica prodotta nello strato convettivo del Sole raggiunge la corona sotto forma di due tipi di onde: sonore o magnetoidrodinamiche. Le prime sono perturbazioni meccaniche di gas che si manifestano sotto forma di variazione di pressione; le altre derivano dall'interazione tra il gas ionizzato e i campi magnetici presenti (teoria delle onde).



Andamento della temperatura espressa in k in funzione della distanza dalla fotosfera espressa in km.

## LA CORONA SOLARE

In espansione	Temperatura: $2 \times 10^6 \text{°C}$	Densità: $10^{-13} \text{ kg/m}^3$
---------------	----------------------------------------	------------------------------------

La corona è uno strato di gas molto rarefatto che si estende per milioni di chilometri dal Sole e la cui forma è legata al ciclo undecennale della stella: più regolare nei periodi di massima, meno regolare nei periodi di minima.

Non brilla di luce propria ma diffonde quella della fotosfera (in quanto le particelle agiscono come la polvere alla luce) e per questo è visibile soltanto durante le eclissi.

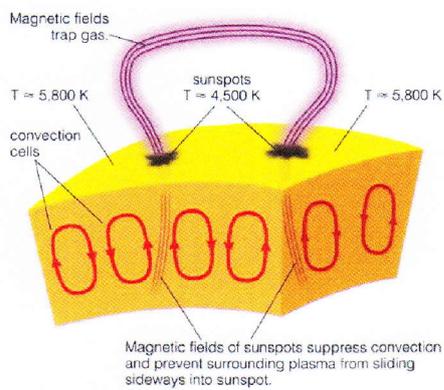
È spesso perturbata da forti esplosioni che liberano una gran quantità di plasma nello spazio, il cosiddetto **vento solare** che fuoriesce dai cosiddetti buchi coronali, regioni che si formano come conseguenza delle linee di forza aperte del campo magnetico

Il flusso del vento solare viene più o meno spesso, a seconda del livello di attività solare, disturbato da **CME**.



## L'attività solare

- **Le macchie solari:** sono regioni con una temperatura più bassa rispetto a quella fotosferica, caratterizzate da una zona detta d'ombra e una di penombra, in cui il campo magnetico è talmente intenso da impedire la convezione. Inibito il moto convettivo non vi è più il trasferimento di energia e quindi di calore.



Le macchie si organizzano in gruppi, ogni gruppo possiede una sua polarità e per ogni gruppo positivo vi sarà anche un gruppo negativo. Questo perché il campo magnetico da un lato sarà uscente dalla superficie solare e dall'altro sarà rientrante. Abbiamo detto che le macchie solari sono indice di attività solare: per descrivere quest'ultima si impiega lo

studio del numero di Wolf:

il campo magnetico fuoriuscendo dalla "superficie" solare inibisce la convezione generando due macchie solari

$$W = k(10g + m)$$

Dove:  $W$  è il numero di Wolf;  
 $k$  è un fattore correttivo e dipende dal diametro dell'obbiettivo del telescopio con cui si effettua l'osservazione,  $k=1$  se il diametro dell'obbiettivo è uguale a 10 cm,  $k<1$  se il diametro è maggiore di 10 cm;  
 $g$  è il numero di gruppi di macchie;  
 $m$  è il numero di macchie.

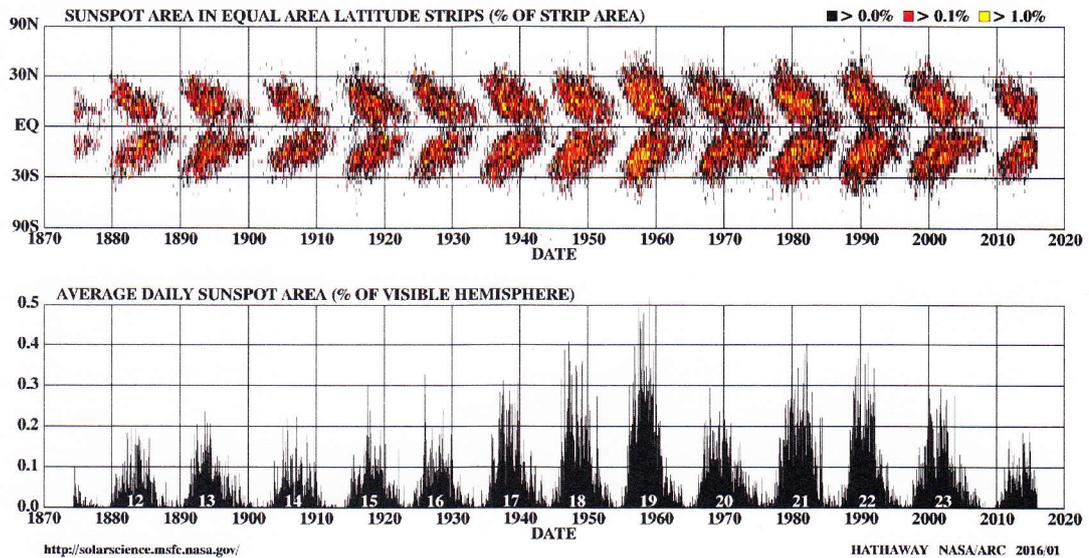
→ Grazie a questo calcolo si è scoperto il ciclo undecennale del Sole, ogni undici anni infatti vi è un minimo e un massimo di attività solare

Es. il minimo di Maunder dal 1645 al 1715 che comportò la piccola era glaciale in Europa e America e diversi cambiamenti climatici (probabilmente il Sole si espanse e la sua rotazione rallentò. Si suppone che un Sole più grande e in lenta rotazione sia anche un Sole più freddo) All'inizio di ogni ciclo undecennale le macchie sono piccole e si formano ad alte latitudini solari, con il tempo le macchie si ingrandiscono e si spostano verso le regioni equatoriali.



→ Grazie all'osservazione delle macchie si è scoperto che il ciclo undecennale è parte di un ciclo magnetico di 22 anni. Fu scoperto analizzando le macchie leader di ogni gruppo. Grazie al magnetogramma solare si apprezzò che le macchie leader dell'emisfero settentrionale hanno polarità opposta a quelle meridionale, polarità che si inverte ogni undici anni.

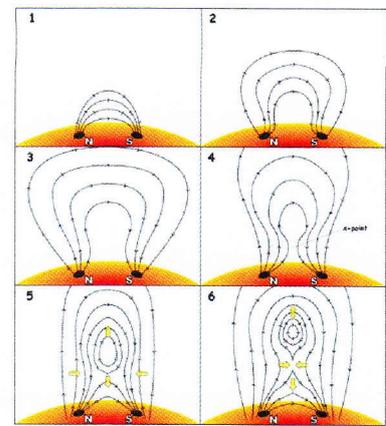
### DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



Sopra: un diagramma a farfalla mostra le posizioni delle macchie sulla superficie del sole dal 1874 ai nostri giorni.  
Sotto: andamento del numero di macchie in funzione agli anni, dal 1874 a oggi.  
Entrambi evidenziano l'andamento undecennale dell'attività magnetica solare.

- **I Flares o Brillamenti:** sono violenti getti di gas ed emettono energia soprattutto nei raggi X e UV per questo non aumentano visivamente la luminosità del sole.

La loro intensità è legata alla quantità di macchie presenti sulla superficie solare, infatti il numero di brillamenti è proporzionale al numero di Wolf. Si formano come conseguenza di un fenomeno denominato come "riconnessione magnetica" durante il quale tubi di flusso magnetico di polarità opposta entrano in contatto spezzandosi e ricollegandosi in una diversa configurazione annichilendo il campo magnetico locale preesistente. Durante questa riconnessione viene rilasciata esplosivamente una gran quantità di energia che si manifesta appunto in quelli che noi chiamiamo Flares.



riconnessione magnetica in un Flare solare



- **CME:** acronimo di Coronal Mass Ejection, sono enormi bolle di gas espulse dal Sole in seguito ad un Flare.
- **Vento solare:** consiste in una corrente di elettroni, protoni, atomi parzialmente ionizzati. L'esistenza di questo vento solare è provata da misurazioni effettuate da diversi satelliti e più semplicemente giustifica la presenza di:
  - Fenomeni aurorali
  - Tempeste magnetiche;
  - Diminuzione dei raggi cosmici che investono la Terra quando questo è particolarmente intenso;
  - Le code delle comete, rivolte in direzione opposta al Sole e contenenti ioni eccitati.

Il vento solare è sempre presente e si intensifica nei periodi di massima attività solare: è infatti il risultato della continua espansione della corona che da "atmosfera statica", per via del calore, tende a trasformarsi in un getto ad alta velocità, il vento solare appunto, che si estende circa per 40 UA .

Il vento solare contiene in se un campo magnetico la cui fonte è presumibilmente il campo magnetico generale del sole.

Il campo magnetico infatti, man mano che ci si allontana dal sole, diventa sempre meno intenso e tende ad espandersi nello spazio invece che rientrare nel sole. In questo suo espandersi, per via della rotazione differenziale del sole, assume un andamento a spirale. Le particelle che compongono il vento si muovono esattamente nello stesso modo in quanto seguono le linee di campo.



## Interazione Sole-Terra

Il campo magnetico terrestre scherma il nostro pianeta dall'impatto diretto del vento solare. Se quest'ultimo non esistesse, il campo magnetico terrestre si estenderebbe nello spazio diminuendo progressivamente di intensità secondo quanto previsto per un campo magnetico con caratteristiche essenzialmente dipolari.

In realtà il campo magnetico terrestre viene notevolmente deformato: la faccia rivolta verso il Sole risulta compressa; dal lato opposto il campo si allunga in una coda molto pronunciata costituita da due lobi di opposta polarità magnetica; la separazione tra linee di campo rivolte verso il Sole e linee allungate a formare la coda determina la formazione, alle alte latitudini, di regioni ad imbuto.

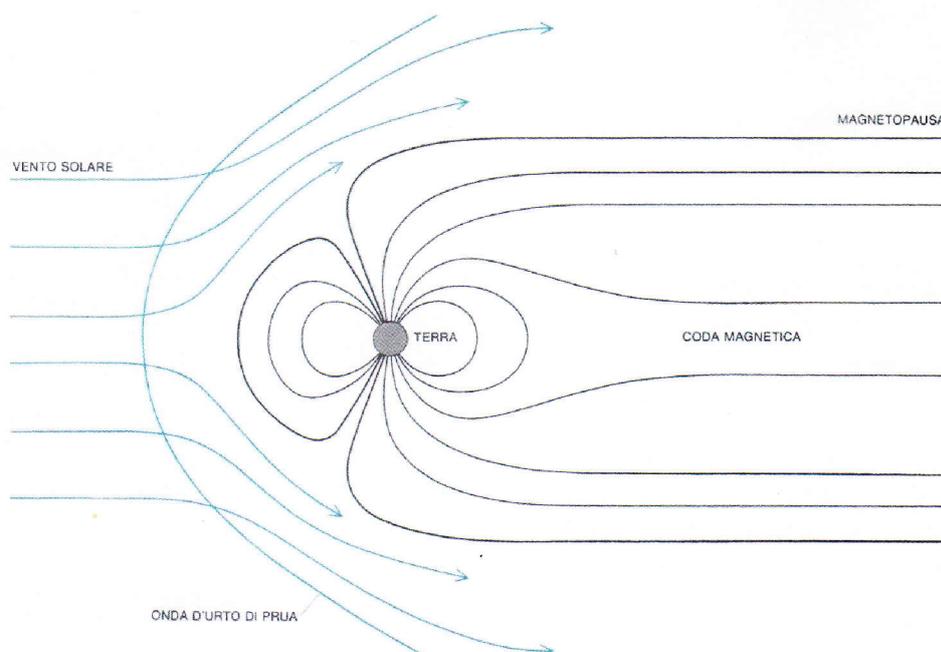
Il vento solare invece acquista le proporzioni di una grande onda d'urto.

La regione in cui il vento solare costringe il campo magnetico terrestre prende il nome di "Magnetosfera".

Se il vento solare fosse sempre costante, la magnetosfera e l'onda d'urto di prua rimarrebbero fisse in una posizione di equilibrio tra la pressione complessiva nel vento solare in arrivo e quella del campo magnetico terrestre.

Tale posizione di equilibrio è detta "punto subsolare", tale punto si sposta in situazioni di estrema attività solare che modifica la pressione e le varie caratteristiche fisiche del vento solare: quando aumenta la pressione del vento solare il punto arretra verso la Terra.

Nonostante tale schermatura, la Terra è comunque soggetta ad alcuni fenomeni tipici dell'interazione tra il vento solare e la sua magnetosfera, tra cui:

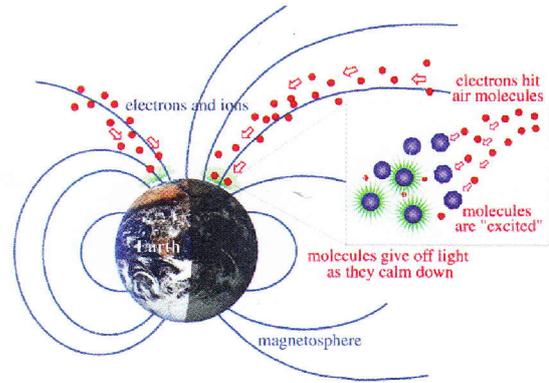


La pressione del vento solare confina il campo magnetico terrestre nella magnetosfera, regione compressa in direzione del sole e allungata in un'ampia coda magnetica in direzione opposta

## Aurora:

Le particelle cariche, provenienti sia dall'emisfero rivolto verso il Sole sia dalla coda geomagnetica, penetrano attraverso le regioni a imbuto, tipiche delle alte latitudini; precipitando verso Terra ed interagendo con i principali costituenti atmosferici, esse provocano le manifestazioni aurorali.

I bagliori luminosi sono infatti provocati dagli elettroni eccitati degli atomi dei gas atmosferici che ritornano al loro livello energetico originale.

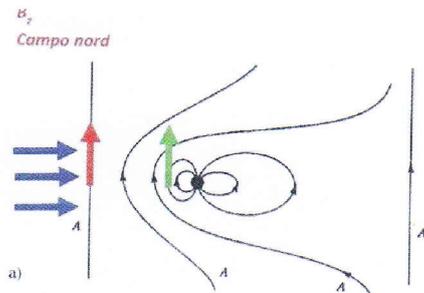


Le particelle cariche penetrano attraverso le regioni ad imbuto provocando i fenomeni aurorali

## Tempeste magnetiche:

Sono perturbazioni della magnetosfera terrestre. Le più intense sono innescate dall'arrivo di ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejections) nuvole di vento solare a velocità più elevata che trascinano nello spazio anche il campo magnetico presente nella regione d'origine.

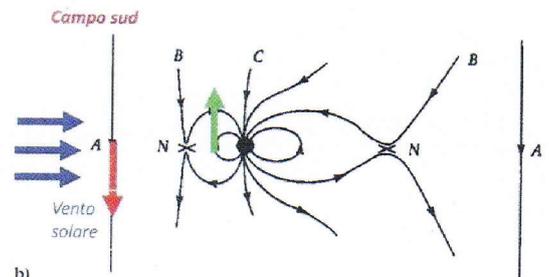
Perché si verifichi una tempesta magnetica è necessario che il campo magnetico trasportato dall' ICME sia orientato verso Sud, cioè antiparallelo al campo geomagnetico.



Interazione di un campo magnetico parallelo a quello terrestre con la magnetosfera del nostro pianeta

Se il campo magnetico trasportato dall'ICME è solo parallelo al campo geomagnetico, questo si limita ad attraversare la magnetosfera mantenendo peraltro le proprie caratteristiche

Se il campo magnetico trasportato dall' ICME è antiparallelo al campo geomagnetico, l'opposta polarità determina l'interconnessione del campo interplanetario con quello magnetosferico creando un punto magneticamente neutro. Ciò facilita il passaggio di particelle attraverso il punto neutro ed il trasferimento di energia dal vento solare alla magnetosfera. Si forma un punto neutro anche nella coda geomagnetica.



Interazione di un campo magnetico antiparallelo a quello terrestre con la magnetosfera del nostro pianeta

Gli studiosi hanno suddiviso lo sviluppo di una tempesta magnetica in fasi successive:

1. Fase SSC (Storm Sudden Comencement) che segnala l'impatto del flusso di vento solare ad altissima velocità sulla magnetopausa;
2. Fase iniziale, durante la quale vi è una prolungata compressione della magnetosfera;
3. Fase principale, corrisponde alla tempesta vera e propria, e determina una decrescita del campo, conseguenza dell'interconnessione delle linee di forza. Si verificano inoltre aggiuntive depressioni di breve durata del campo geomagnetico sono essenzialmente determinate da processi di riconnessione di linee di forza di opposte polarità che avvengono nella coda geomagnetica;
4. Fase di recupero, durante la quale si attenua il fenomeno.

Durante una tempesta intensa, manifestazioni aurorali vengono osservate anche a medie e basse latitudini, a testimonianza di un processo di interconnessione che coinvolge linee di forza magnetosferiche molto interne e di un conseguente notevole allargamento delle regioni a imbuto (cuspidi).

### **Implicazioni tecnologiche:**

In seguito ad intensa attività solare si riscontrano anche inconvenienti sui sistemi tecnologici.

Per esempio è possibile che:

- Le particelle ad alta energia provocano malfunzionamenti e anomalie di vario genere nei satelliti;
- Astronauti e passeggeri di aerei ad alta quota sono esposti a flussi di particelle e quantità di radiazioni di molto superiori al normale;
- Si registrino interferenze in alcune bande di comunicazione, nella rilevazione radar e anche nella determinazione della posizione tramite GPS a causa di un accentuata emissione radio e di disturbi nella ionosfera, l'insieme delle regioni dell'alta atmosfera terrestre sufficientemente ionizzate da influenzare la propagazione di radioonde. Queste regioni sono prodotte principalmente per l'azione della radiazione ultravioletta e X del Sole sui gas atmosferici;
- Vi siano danneggiamenti ai cavi trans-oceanici per le telecomunicazioni, ai gasdotti e oleodotti, ai trasformatori elettrici a causa dello sviluppo di GIC, correnti elettriche geomagneticamente indotte.



Gli studiosi hanno suddiviso lo sviluppo di una tempesta magnetica in fasi successive:

1. Fase SSC (Storm Sudden Comencement) che segnala l'impatto del flusso di vento solare ad altissima velocità sulla magnetopausa;
2. Fase iniziale, durante la quale vi è una prolungata compressione della magnetosfera;
3. Fase principale, corrisponde alla tempesta vera e propria, e determina una decrescita del campo, conseguenza dell'interconnessione delle linee di forza. Si verificano inoltre aggiuntive depressioni di breve durata del campo geomagnetico sono essenzialmente determinate da processi di riconnessione di linee di forza di opposte polarità che avvengono nella coda geomagnetica;
4. Fase di recupero, durante la quale si attenua il fenomeno.

Durante una tempesta intensa, manifestazioni aurorali vengono osservate anche a medie e basse latitudini, a testimonianza di un processo di interconnessione che coinvolge linee di forza magnetosferiche molto interne e di un conseguente notevole allargamento delle regioni a imbuto (cuspidi).

### **Implicazioni tecnologiche:**

In seguito ad intensa attività solare si riscontrano anche inconvenienti sui sistemi tecnologici.

Per esempio è possibile che:

- Le particelle ad alta energia provochino malfunzionamenti e anomalie di vario genere nei satelliti;
- Astronauti e passeggeri di aerei ad alta quota siano esposti a flussi di particelle e quantità di radiazioni di molto superiori al normale;
- Si registrino interferenze in alcune bande di comunicazione, nella rilevazione radar e anche nella determinazione della posizione tramite GPS a causa di un accentuata emissione radio e di disturbi nella ionosfera, l'insieme delle regioni dell'alta atmosfera terrestre sufficientemente ionizzate da influenzare la propagazione di radioonde. Queste regioni sono prodotte principalmente per l'azione della radiazione ultravioletta e X del Sole sui gas atmosferici;
- Vi siano danneggiamenti ai cavi trans-oceanici per le telecomunicazioni, ai gasdotti e oleodotti, ai trasformatori elettrici a causa dello sviluppo di GIC, correnti elettriche geomagneticamente indotte.



## *Conclusioni*

---

Danneggiamenti di questo genere hanno un ingente impatto economico e sociale. Economico in quanto si registrano danni agli impianti di satelliti e strutture che devono poi essere riparati (con l'impiego di addirittura quasi 50 miliardi di dollari); Sociale in quanto black-outs e disturbi di vario genere provocano nella popolazione, ormai sempre più legata alla tecnologia, un senso di allarme e di paura che si espande a macchia d'olio e che rischia di provocare effetti più disastrosi di quelli delle tempeste stesse.

La sfida attuale è quella quindi di imparare a prevedere con buona approssimazione la dinamica della magnetosfera e della ionosfera e di comprendere al meglio i processi fisici che avvengono nell'atmosfera solare. Lo studio di tale ionosfera risulterebbe molto più efficace se la composizione atmosferica non risentisse di gravi modificazioni come invece negli ultimi anni si sta registrando.

Ritengo quindi che questi studi debbano essere affiancati anche da un buon livello di sensibilizzazione della popolazione: se infatti la ricerca in sé può limitare i problemi di tipo economico, prevedendo l'eventuale sviluppo di tempeste magnetiche e aiutando a sviluppare sistemi in grado di difendere le attrezzature, la sensibilizzazione può aiutare a risolvere i problemi di tipo sociale, limitando l'espansione della paura derivante dalla non conoscenza del fenomeno e favorendo una serie di comportamenti che porterebbero benefici non solo durante lo sviluppo di questi intensi fenomeni magnetici ma anche nella quotidianità.



La prima parte dell'approfondimento (relativa al sole come stella e alla sua attività) si basa sugli appunti presi durante le lezioni frequentate allo Stage del modulo di Tecniche astronomiche per la fisica solare di Tor Vergata ampliati e verificati attraverso la seguente bibliografia e la seguente sitografia.

## BIBLIOGRAFIA

---

- V. Mascellani, *Il Sole: guida alla stella che ci dà vita*, Albino, Sandit Libri, 2010
- E. H. Parker, *Il vento solare*, in "Le Scienze quaderni", 80, 1994, pp. 5-14
- J. M. Pasachoff, *La corona solare*, in "le scienze quaderni", 80, 1994, pp. 15-24
- U. Villante, *Le Relazioni Sole-Terra lo Space Weather*, in "la fisica nella scuola", XLIX, 4, 2016, pp. 153-162
- R. Wolfson, *l'attività della corona solare*, in "le scienze quaderni", 80, 1994, pp. 25-35

## SITOGRAFIA

---

- <http://www.treccani.it/enciclopedia>
- <https://it.wikipedia.org/wiki>
- <https://daltonsm minima.wordpress.com/tag/dinamo-solare/>

