

Introduzione

La ionosfera si può pensare basata semplicemente su due requisiti: l'esistenza di un'[atmosfera neutra](#) e la presenza di una sorgente di ionizzazione per i gas che la compongono. Le sorgenti di ionizzazione includono i fotoni ultravioletti e tengono conto della precipitazione di particelle dotate di energia. I processi cui danno luogo sono, rispettivamente, la fotoionizzazione e la ionizzazione collisionale. I fotoni UV provengono soprattutto dal [Sole](#); le particelle ionizzate possono provenire dalla galassia, attraverso i [raggi cosmici](#), dal Sole, dalla magnetosfera e dalla stessa ionosfera. Sebbene la ionizzazione atmosferica sia causata dall'insieme di queste fonti, in realtà il ruolo dei fotoni ultravioletti solari è dominante.

Negli ultimi anni lo studio dell'alta atmosfera ionizzata ha permesso di sviluppare la cosiddetta meteorologia spaziale, meglio conosciuta come [Space Weather](#). Questo termine indica usualmente lo studio delle condizioni fisiche del Sole, del [vento solare](#), della magnetosfera, della ionosfera, e della termosfera in grado di influenzare le prestazioni e l'attendibilità dei sistemi tecnologici sia spaziali che posti a terra e che possono provocare danni alla salute degli esseri umani.

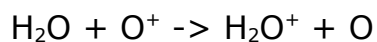
L'atmosfera neutra

L'atmosfera neutra è suddivisa in:

- *Troposfera*: è la zona situata tra la superficie terrestre e circa 13 km in cui la temperatura diminuisce con l'aumentare della quota. Essa è sede dei fenomeni meteorologici. La diminuzione della temperatura si arresta nella tropopausa.
- *Stratosfera*: si estende dai 13 ai 50 km circa, ed in essa la temperatura cresce con la quota. Questo avviene a causa dei fenomeni di assorbimento dei raggi UV da parte dell'ozono, fortemente presente in questa regione. La stratosfera termina nella stratopausa.
- *Mesosfera*: è la regione posta approssimativamente tra i 50 e gli 80 km di altezza dalla superficie terrestre. In essa la temperatura torna a decrescere con la quota raggiungendo un minimo di circa 190 K a 80 km. La mesosfera si chiude con la mesopausa.
- *Termosfera*: è situata tra gli 80 ed i 400 km. La termosfera è la regione, situata sopra la mesosfera, che mostra una variazione della temperatura con la quota ben più forte che negli altri strati atmosferici. Infatti in essa si va da un minimo assoluto di

temperatura, relativo alla mesopausa, ad un massimo assoluto relativo all'esosfera. Dal punto di vista ionosferico la sua importanza risiede nel fatto che essa è sede di drastici cambiamenti della composizione atmosferica, ed altresì, nel fatto che a queste quote acquista importanza la presenza di particelle ionizzate, le quali conferiscono alla miscela gassosa così composta proprietà di magnetoplasma. La radiazione solare ultravioletta viene assorbita nella termosfera, e qui si ritrovano la maggior parte dei sistemi di correnti responsabili delle variazioni del campo geomagnetico. All'interno della termosfera si individua, secondo criteri basati sulla composizione, un'altra regione, la turbopausa, che separa la zona in cui predomina una miscela gassosa composta da tutti i principali elementi atmosferici quali N₂, O₂, N, O, He, Ar, la omosfera, dalla zona dove, invece, è la diffusione a regolare le variazioni di composizione e la cui caratteristica è quella di veder diminuire la presenza dei componenti più pesanti all'aumentare della quota, l'eterosfera.

Fra i costituenti sopra citati non si è menzionato il vapore acqueo. Questo, sebbene nella termosfera sia presente in quantità piuttosto piccole rispetto agli strati atmosferici sottostanti, ha un'importanza primaria nella regione ionosferica F. A queste quote, infatti, avviene la seguente reazione:



che è alla base della creazione dei cosiddetti buchi ionosferici, cioè di forti depressioni nell'andamento della densità elettronica. Infatti lo ione molecolare H₂O⁺ è responsabile del processo di cattura elettronica che causa la diminuzione del quantitativo di elettroni liberi a quote ionosferiche. Tale fenomeno viene osservato, però, prevalentemente a basse latitudini e ad opera di grosse quantità di vapore acqueo. La dinamica della termosfera è dominata da fenomeni a larga scala, come: venti zionali, maree, ed onde. Dei fenomeni su scale minori, solo le onde di gravità sembrano avere una reale influenza sul suo comportamento dinamico.

- *Esosfera*: è la zona che si estende dai 500 km fino ai confini dell'atmosfera.
-

Il Sole

Il Sole è una stella di media grandezza, che può essere descritta come una sfera gassosa massiva costituita, principalmente, da idrogeno (75%) e da elio (25%) e da costituenti minori come carbonio, azoto, ossigeno, litio e berillio (~1 %). Il Sole emette continuamente radiazione elettromagnetica e corpuscolare nello spazio circostante. La fonte primaria della sua energia risiede in reazioni termonucleari, fortemente esotermiche, che danno luogo a

temperature interne di 10 - 20 milioni di K. Le caratteristiche fisiche principali del Sole sono riassunte in tabella.

RAGGIO	$R = 6,95 * 10^5 \text{ km}$
MASSA	$M = 1,99 * 10^{30} \text{ kg}$
VOLUME	$V = 1,41 * 10^{27} \text{ m}^3$
DENSITÀ MEDIA	$\rho = 1,408 \text{ g / cm}^3$
ACCELERAZIONE di GRAVITÀ SUPERFICIALE	$g = 2,738 * 10^2 \text{ m/s}^2$

Il Sole viene usualmente diviso in una regione interna, nota come *nucleo*, ed una zona sovrastante a sua volta suddivisa in: *zona di convezione*, *fotosfera*, *cromosfera* e *corona* (fig.1.1).

- Nucleo:**
in tale zona, estesa per circa 1/4 del raggio solare, si trova grosso modo metà della massa totale del Sole e viene prodotto il 99% dell'energia complessivamente emessa; la sua temperatura è di circa $1,5 * 10^7 \text{ K}$ e la sua pressione di $2,5 * 10^{11}$ atmosfere. La materia del nucleo, sebbene sia fortemente addensata, si trova allo stato gassoso, quindi gli elettroni ed i nuclei si muovono rapidamente come particelle libere. La reazione esotermica più importante che avviene in questa regione è la formazione di nuclei di He dalla fusione di nuclei di H ($4\text{H}^1 \rightarrow \text{He}^4$).
- La zona di convezione:**
in questa regione la temperatura risulta essere più bassa di quella del nucleo. Questa caratteristica ha due importanti conseguenze: la prima è quella che vede una significativa frazione degli elettroni muoversi abbastanza lentamente da poter essere catturati dagli stati energetici leganti dell'idrogeno e di altri nuclei per formare nuovamente degli atomi neutri; la seconda, legata proprio all'aumento del numero di atomi neutri, vede la crescita dell'opacità del gas e, quindi, il conseguente incremento del gradiente di temperatura. Si viene così a creare un moto convettivo turbolento che dà luogo ad un trasporto diretto di energia.
- Fotosfera:**
si estende per circa 100 km di spessore e si considera come la superficie visibile del Sole; in essa la temperatura, la densità e la pressione sono minori di quelle tipiche del nucleo e della zona di convezione. La temperatura dell'intera regione varia da 6500 K alla base della fotosfera ad un minimo di 4400 K sul confine con la cromosfera. La maggior parte della radiazione visibile dalla Terra viene emessa da questo strato.
- Cromosfera:**
è la regione situata al di sopra della fotosfera ed è visibile solo durante le eclissi solari. La sua colorazione tende al rosso per la predominanza della linea rossa di H (656.3 nm). La cromosfera è una zona termicamente assai disomogenea, con temperature tipiche tra 4400 K 10^6 K; in essa, a causa della diminuzione di densità e dei moti convettivi fotosferici, si

instaura una rete di campi magnetici, dai bordi della quale partono getti brillanti, alti fino a $1 \cdot 10^4$ km, conosciuti come *spiculae*.

- **Corona:**

questa zona è caratterizzata da una bassa densità e da un'intensità di radiazione in luce bianca più bassa di un fattore 10^{-6} rispetto al disco solare. Proprio a causa di queste caratteristiche la sua osservazione risulta piuttosto difficoltosa. La sua temperatura è mediamente intorno ai 10^6 K. La corona si espande, a causa del suo gradiente di pressione, contro la gravità solare verso lo spazio interplanetario. La misura di questa espansione risulta controllata dall'attività solare, infatti durante i periodi di massima attività la corona raggiunge la sua estensione maggiore ed è quasi sfericamente simmetrica, mentre nei periodi di minima attività essa assume le sue dimensioni minime ed è fortemente asimmetrica. E' proprio da qui che ha origine il vento solare che occupa un ruolo importantissimo nella fisica ionosferica.

L'attività solare si manifesta attraverso una serie di fenomeni, quali le *macchie solari*, le *protuberanze*, i *brillamenti*, ed i *buchi coronali*.

- L'esistenza delle *macchie solari*, in particolare, è nota fin dal quarto secolo a.C.. Esse appaiono come grosse macchie scure e sono sedi di forti campi magnetici (mediamente intorno ai 0,3 T). La loro struttura risulta costituita da un'ombra centrale, la cui temperatura è di circa 4100 K, circondata da un alone, detta penombra, composta da filamenti di luce, alternati radialmente a zone più scure. Il campo risulta quasi verticale nell'ombra ed orizzontale nella penombra. Il numero delle macchie varia secondo un ciclo undecennale. L'indice R, legato proprio a questo ciclo, è funzione del numero di macchie solari ed è pari a: $R = a(m + 10g)$, dove a è una costante, m è il numero di macchie solari e g è il numero di gruppi in cui esse si presentano. Le macchie si manifestano in zone ad alta latitudine e poi, man mano che si svolge il ciclo, migrano verso l'equatore solare. Esse sono caratterizzate da una colorazione più scura rispetto al disco solare, causata dal fatto che la loro temperatura risulta, relativamente alle zone circostanti, più bassa. Questo raffreddamento locale è dovuto alla presenza del campo magnetico, il quale inibisce la convezione e rende conseguentemente minore la temperatura interna delle macchie.
- Le *protuberanze*, invece, sono enormi getti verticali di plasma (per plasma si intende un mezzo materiale ionizzato e complessivamente neutro) ed appaiono come filamenti scuri sul disco solare. Tali getti sono cento volte più freddi e più densi delle zone coronali circostanti, possono durare anche mesi e riescono a contrastare la gravità solare mediante un campo magnetico di circa 0,5-1 mT.
- I *brillamenti* solari sono costituiti da rilasci esplosivi di energia all'interno dell'atmosfera solare, seguiti da una graduale diminuzione di moto e di temperatura. L'ordine di grandezza dell'energia rilasciata da un grosso

brillamento (che si verifica solo poche volte nell'arco di un ciclo solare) è di 10^{32} erg. I brillamenti si verificano solitamente nelle zone in cui sono presenti campi magnetici forti, complessi e con configurazioni instabili. Dalle regioni interessate dai brillamenti vengono emessi raggi X, protoni e nubi di plasma.

- I *buchi coronali*, infine, sono strutture "aperte" della corona che appaiono come regioni relativamente più fredde rispetto alle zone adiacenti. Il termine di struttura aperta sta a significare che dal buco coronale le linee del campo magnetico solare si dirigono verso lo spazio circostante invece di richiudersi sulla superficie del Sole. Attraverso queste linee di campo il materiale ionizzato di origine solare può viaggiare verso lo spazio interplanetario.

Vento solare

Il vento solare è costituito da un flusso di plasma solare ionizzato ed è conseguenza della grossa differenza di pressione gassosa che esiste tra la corona solare e lo spazio interstellare. Tale differenza di pressione permette l'espansione del plasma contro la forza di gravità solare. L'esistenza del vento solare era stata già teorizzata durante gli anni '50, quando si cominciò ad osservare l'evidente correlazione tra piccole variazioni del [campo magnetico terrestre](#) (attività geomagnetica) e fenomeni osservabili sulla superficie solare (attività solare), ma essa fu definitivamente provata solo tramite osservazioni fatte nello spazio verso la metà degli anni '60.

Si può pensare al vento solare come ad un fluido conduttore immerso in un campo magnetico che ne è parte integrante. Quest'ultimo assume forma di spirale di Archimede a causa del moto di trascinamento indotto nel plasma dalla rotazione del Sole e risulta, all'altezza della Terra, approssimativamente diretto a 45° dalla linea Sole - Terra. Tale campo prende il nome di campo magnetico interplanetario (IMF 'Interplanetary Magnetic Field'). La velocità media del vento solare si aggira intorno ai 300 km/s, anche se il materiale ionizzato che viene emesso, per esempio, da un buco coronale o da un brillamento, conosciuto come HSSWS (high speed solar wind stream), raggiunge velocità di circa 500 km/s. Il vento solare possiede una elevata conducibilità elettrica.

Le interazioni Sole - Terra risultano evidenti se si pensa che il vento solare, venendo significativamente influenzato dall'attività solare, trasmette tale influenza a tutti i pianeti, le comete, le particelle ed i [raggi cosmici](#) con cui viene a contatto.

Parametri tipici del vento solare "quieto" alla distanza di 1 AU

velocità	300 KM/S
densità dei protoni	10 CM ⁻³
densità di flusso	3*10 ⁸ CM ⁻² S ⁻¹
composizione	96% protoni, 4% ioni, costituenti minori ed elettroni
temperatura dei protoni	4*10 ⁴ K
temperatura degli elettroni	1,5*10 ⁵ K
intensità del campo magnetico	4 nT

L'interazione tra il vento solare ed il campo magnetico della Terra dà luogo alla formazione di una zona detta magnetopausa, che costituisce il luogo dei punti dello spazio ove le azioni del campo geomagnetico e quelle del vento solare si equilibrano. La regione di spazio compresa all'interno della magnetopausa è nota come magnetosfera. Sul versante illuminato della Terra la magnetosfera assume una forma fortemente emisferica, mentre, sul versante opposto al Sole, essa ha, approssimativamente, la forma di un cilindro di diametro pari a circa 40 raggi terrestri ed esteso per una lunga e sconosciuta distanza nello spazio. Tale cilindro è chiamato coda magnetica (magnetotail). Nella parte diurna della Terra, le linee di forza del campo geomagnetico a più bassa latitudine, benché compresse, mantengono la loro forma di linee di campo dipolare, mentre le linee ad alta latitudine vengono spazzate dal vento solare nella coda magnetosferica e si sviluppano in regioni lontane dalla Terra.

Il carattere supersonico che assume la velocità del vento solare all'altezza della Terra crea lo sviluppo di un fronte d'urto. La regione compresa tra la magnetopausa ed il fronte d'urto viene usualmente chiamata guaina magnetica (magnetosheat). Nella magnetopausa fra le linee di forza che rimangono nella parte diurna e quelle che vengono spazzate nella coda magnetosferica vi è una stretta regione di campo zero, la cui proiezione sulla calotta polare individua una zona, detta cleft, dove le particelle del vento solare possono entrare e raggiungere direttamente le regioni ionosferiche dell'atmosfera.

Raggi cosmici

I raggi cosmici non sono veri e propri raggi, ma particelle. Essi sono atomi ionizzati, tipicamente protoni e particelle alfa, che vengono prodotti nello spazio da sorgenti quali: il Sole, le stelle, le Supernove, le stelle di neutroni, i buchi neri, galassie radio, ecc. I raggi cosmici viaggiano a velocità molto vicina a quella della luce. L'accelerazione dei raggi cosmici è ancora oggetto di studio,

specie per quelli ad altissima energia. Due sono i meccanismi che sembrano avere un ruolo dominante: l'accelerazione di Fermi (suggerita per la prima volta da Fermi nel 1949) e la spinta magnetica (suggerita nel 1963 da Hans Alfvén).

I raggi cosmici sono stati classificati in tre tipi:

- Raggi cosmici galattici, originati al di fuori del sistema solare
- Raggi cosmici solari, originati dai brillamenti solari
- Raggi cosmici "anomali", originati nello spazio interstellare.

L'atmosfera terrestre ci protegge dall'esposizione diretta ai raggi cosmici. I raggi cosmici possono provocare disturbi nelle comunicazioni radio delle regioni polari (si veda, inoltre, Space Weather)

Space Weather

Lo "Space Weather" riguarda la comprensione e, quando necessario, la mitigazione dell'impatto dei fenomeni transienti dello spazio esterno sugli esseri umani e sui sistemi tecnologici. L'impatto delle propagazioni radio ad alta frequenza è noto fin dagli anni '30, ma i recenti sviluppi tecnologici, come, ad esempio, il GPS (Global Positioning System) hanno dato luogo a nuovi utilizzi della propagazione radio trans-ionosferica che costituiscono, quindi, oggetto di studio per lo "Space Weather". Analogamente, l'impatto dei protoni solari sui sistemi di navigazione spaziale viene studiato da circa 40 anni, ma, recentemente, l'Unione Europea ha mostrato forte interesse verso l'indagine degli effetti che tali fenomeni possono causare ai voli commerciali e/o civili.

A monte della tecnologia e della gestione applicata per la prevenzione degli effetti dannosi sui sistemi tecnologici e sugli esseri umani, deve esistere una solida struttura scientifica in grado di studiare i fenomeni fisici di interesse e, soprattutto, di valutarne la loro variabilità nel tempo. Questo è di cruciale importanza per la realizzazione di *strategie di mitigazione*. In particolare, è importante individuare i casi in cui un singolo fenomeno fisico può causare diversi effetti come, ad esempio, le molteplici conseguenze che la variazione del profilo verticale di densità elettronica può causare sia sulle comunicazioni in radiofrequenza, sia sui sistemi GPS. L'individuazione di questi temi comuni è importante al fine di ridurre i costi destinati alle strategie di mitigazione. A questo scopo l'indagine scientifica è essenziale.