

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

**Relazione per la prova finale**

***«Esplorazione delle atmosfere: studio del plasma ed  
implicazioni sullo space weather»***

Tutor universitario: Prof. Roberta Bertani

Laureanda: *Ludovica Gabellone*

Padova, 27/09/2024

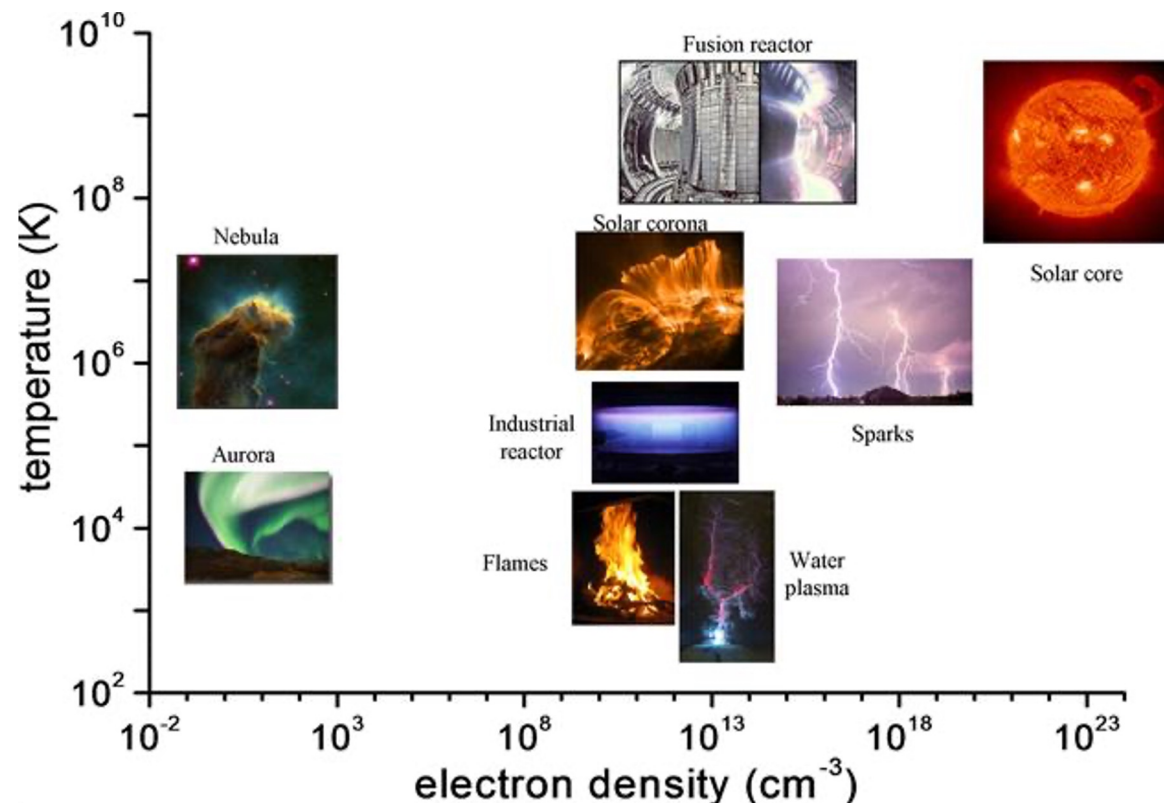
La materia può assumere differenti stati di aggregazione denominati “**stati della materia**” a seconda delle proprietà meccaniche che manifesta. In particolare, può presentarsi nelle tre forme maggiormente conosciute quali stato solido, stato liquido e gassoso oppure come **plasma**: cioè come un **gas ionizzato** a causa delle temperature molto elevate, per cui l’energia fornita può rompere i legami presenti tra le molecole ed all’interno degli atomi. Lo scopo di questa tesi è esaminare in dettaglio il plasma analizzando le sue caratteristiche fisiche e illustrando le principali applicazioni nei vari ambiti tecnologici e scientifici.



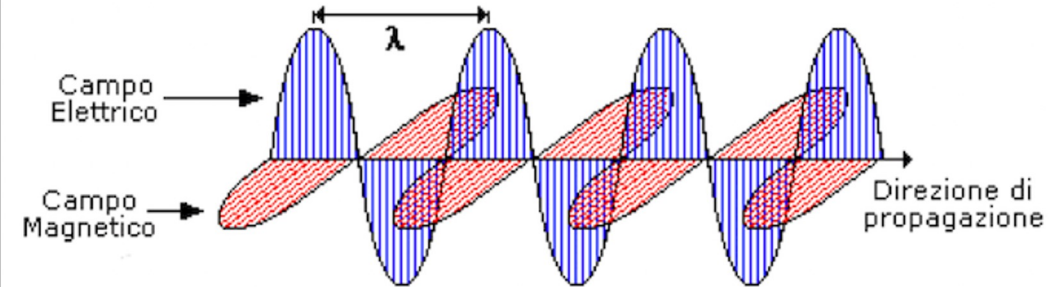
Un gas ionizzato è un gas in cui una frazione significativa delle sue particelle perde o guadagna elettroni trasformandosi in ioni attraverso meccanismi quali l'interazione con radiazioni ad alta energia o le collisioni tra particelle a temperature elevate. La composizione chimica del plasma comprende infatti: elettroni liberi, ioni positivi e talvolta atomi o molecole neutre, senza considerare che può anche emettere fotoni e quindi generare energia sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Tale stato è caratterizzato inoltre dal moto collettivo e dalla quasi-neutralità, mantenuta non superando la **lunghezza di Debye** pari a:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k / q_e^2}{n_e / T_e + \sum_{ij} j^2 n_{ij} / T_i}}$$



Responsabili del movimento e delle proprietà del plasma sono i **campi elettromagnetici**, in particolare, il trasporto di questo stato nello spazio avviene attraverso processi di trasferimento quali:



- la diffusione, con cui gli ioni si spostano da regioni ad alta densità verso regioni a bassa concentrazione
- la convezione, dovuta al movimento del fluido stesso (vento solare)
- la conduzione per trasportare il calore
- l'uso delle radiazioni elettromagnetiche

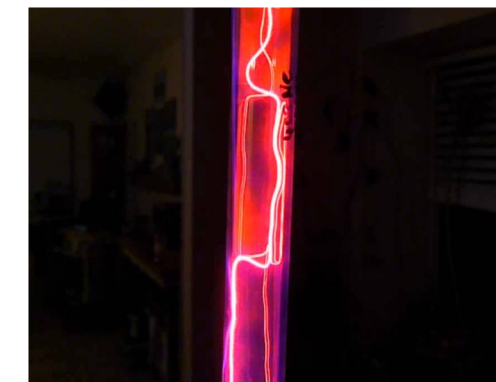
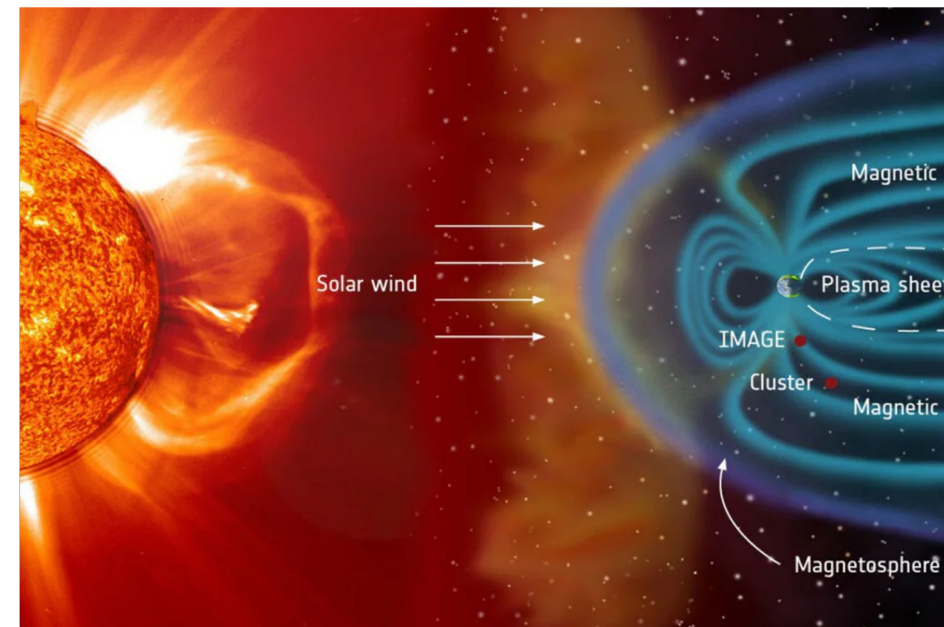
Tali moti sono tipicamente descritti dal modello fisico o cinetico e vengono risolti attraverso **l'equazione di Boltzmann** che permette di studiare il comportamento statistico delle particelle tenendo conto delle collisioni e delle interazioni collettive :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} f + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{collisioni}}$$

Dal nucleo della Terra fino alle regioni superiori dell'atmosfera, il plasma può essere presente ovunque: nell'**illuminazione artificiale** fluorescente, in alcuni fenomeni atmosferici, così come nelle atmosfere stellari o planetarie.

Il **vento solare** è infatti un flusso continuo di protoni ed elettroni che influenza l'**eliosfera** che avvolge il sistema solare e che viene, invece, deviato dalla **magnetosfera**.

Al di sopra della superficie terrestre è poi presente uno strato consistente di plasma che forma la **ionosfera**, regione importante per le comunicazioni radio.

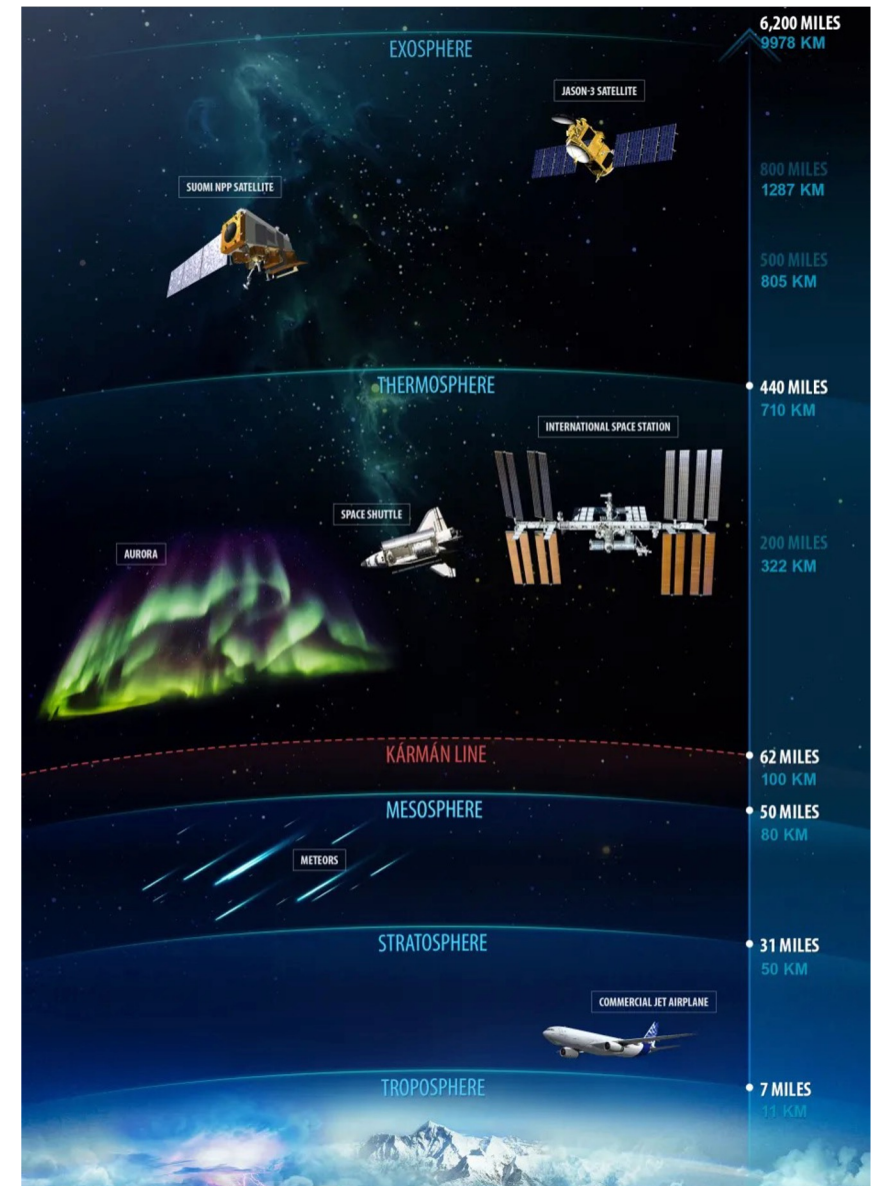




L'**atmosfera terrestre** è costituita principalmente da azoto (78%), ossigeno (21%), tracce di argon (0,9%), anidride carbonica 0,03-0,04% e vapore acqueo, fungendo da “protezione” dai meteoroidi e dalla radiazione solare e si suddivide in:

- troposfera, caratterizzata da numerosi fenomeni meteorologici
- stratosfera che assorbe la radiazione ultravioletta
- mesosfera, dove la temperatura diminuisce drasticamente
- termosfera che include la ionosfera
- esosfera, strato che sfuma nello spazio

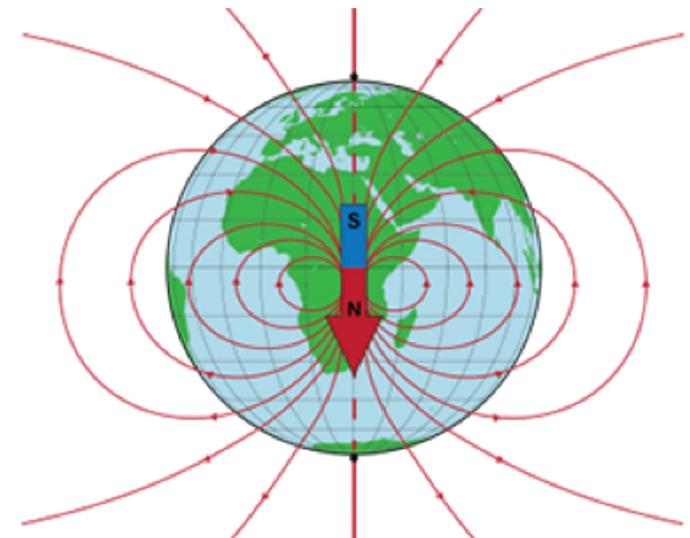
Tale stratificazione risulta essere stabile e disposta in modo che la fascia di gas più leggera si trovi al di sopra di quella più densa.



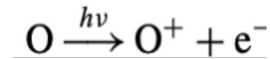
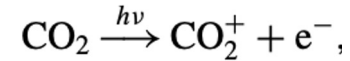
È una delle regioni dell'atmosfera caratterizzata dalla presenza di un'alta concentrazione di particelle cariche (plasma) e dalle variazioni della densità elettronica e delle specie ionosferiche dipendenti dall'altitudine. La ionosfera terrestre si estende tra i 40 e 1.000 chilometri di altitudine, dividendosi in tre diverse sotto-regioni:

- lo “**strato D**” (60-90 km), una mesosfera relativamente più densa e meno riflettente per le onde radio.
- lo “**strato E**” realizzato attraverso l'ionizzazione dell'ossigeno atomico e molecolare posto tra 90-150 km.
- lo “**strato F**” (150-1000 km), suddiviso in F1 e F2.

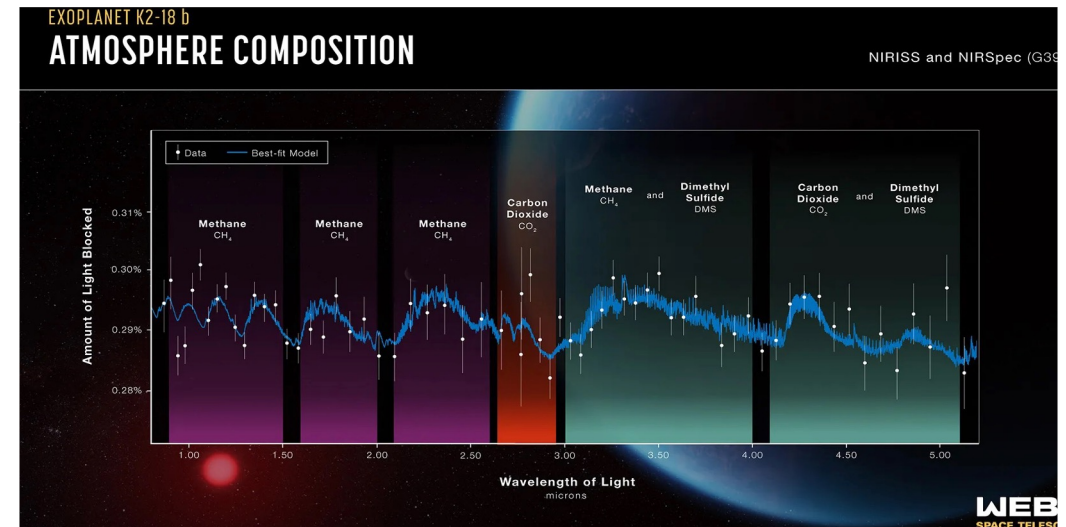
La dinamica ionosferica è strettamente collegata al campo geomagnetico che si instaura a partire da atomi o molecole che vengono ionizzati tramite l'assorbimento di fotoni ad alta energia durante il giorno.



L'atmosfera marziana è composta per il 95% da CO<sub>2</sub> e da ioni di ossigeno O<sup>+</sup> che seguono le seguenti reazioni chimiche:



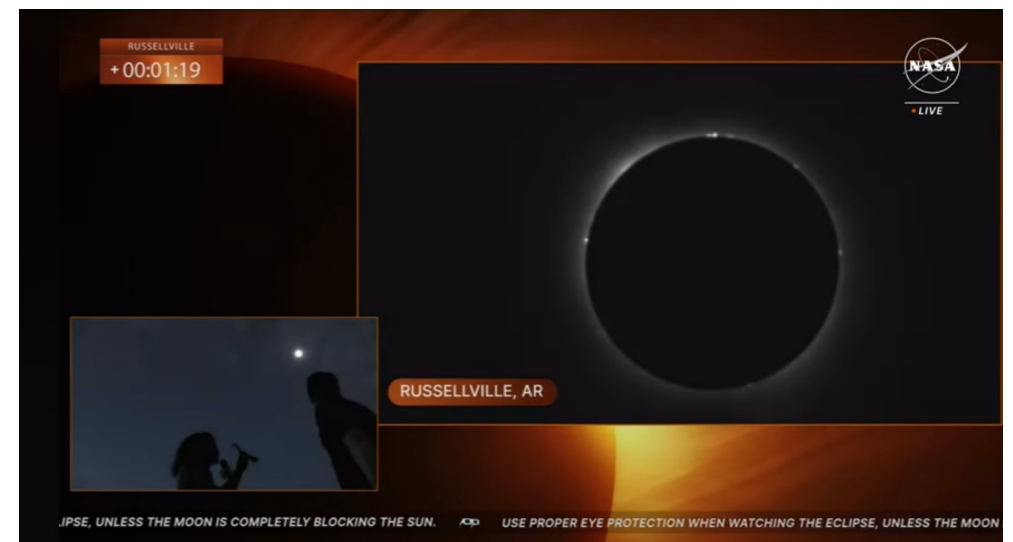
Il pianeta non possiede un campo magnetico globale forte e, pertanto, la sua ionosfera è meno protetta dal vento solare e più vulnerabile all'erosione, così come quella di Venere.



Un'ulteriore atmosfera oggetto di studio è quella dell'**esopianeta K2-18b**, le cui osservazioni (con Hubble e James Webb) hanno rilevato la possibile presenza di vapore acqueo e, quindi, di condizioni compatibili con la vita.

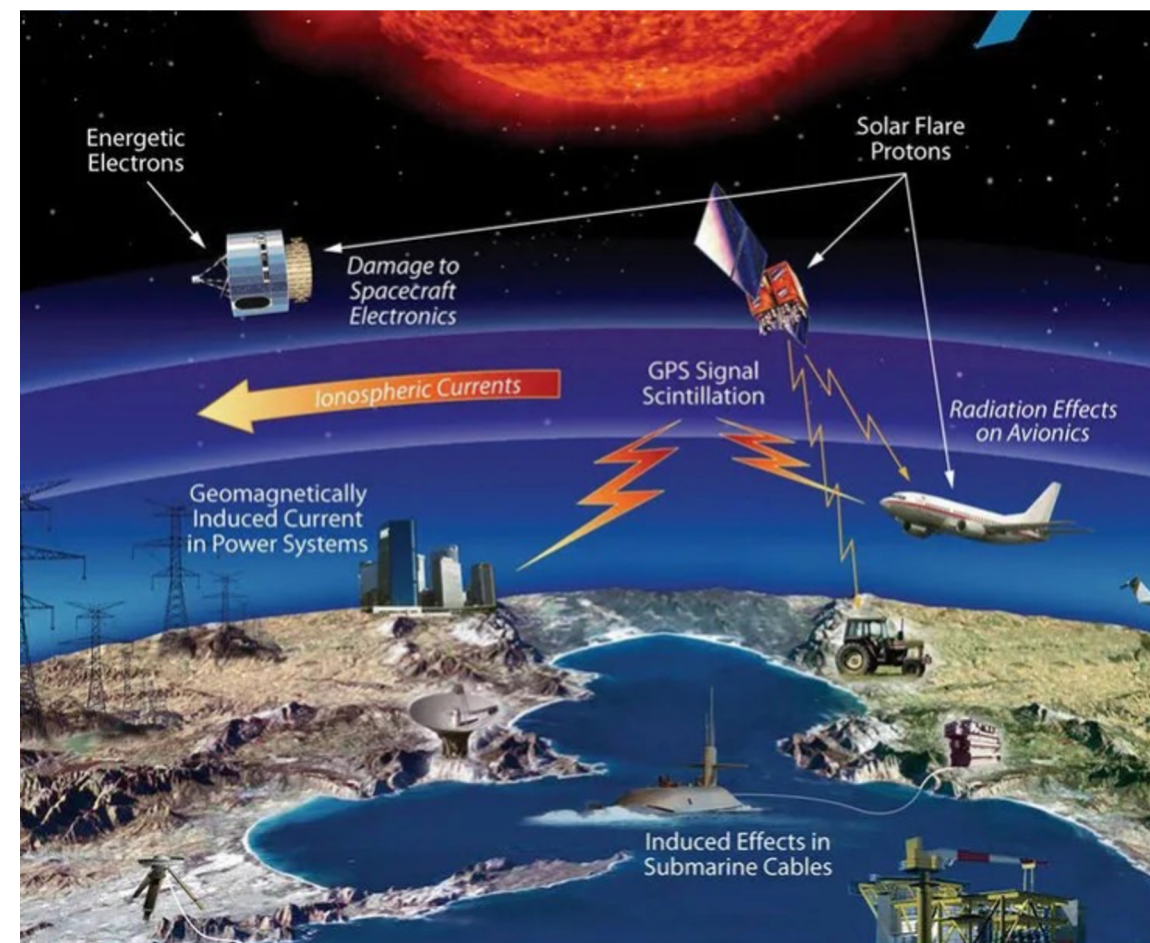


Il primo strato visibile, la **fotosfera**, è caratterizzato da macchie solari, mentre la **cromosfera**, oltre ad essere meno densa e più calda, presenta fenomeni quali le prominente: strutture di plasma visibili durante le eclissi solari totali, come quella che ha avuto luogo l'8 aprile di quest'anno in gran parte del Nord America. Visibile durante tale fenomeno è risultato anche lo strato più esterno dell'atmosfera, ossia la **corona solare**: caratterizzata da alta temperatura e composta da un plasma in cui l'elemento dominante è l'idrogeno.



Con il termine "**meteorologia spaziale**" ci si riferisce alle condizioni ambientali, originate dal Sole, che influiscono sull'atmosfera terrestre e sul campo magnetico e che risultano quindi fondamentali da comprendere per tutelare le infrastrutture tecnologiche moderne e garantire la riuscita delle missioni spaziali.

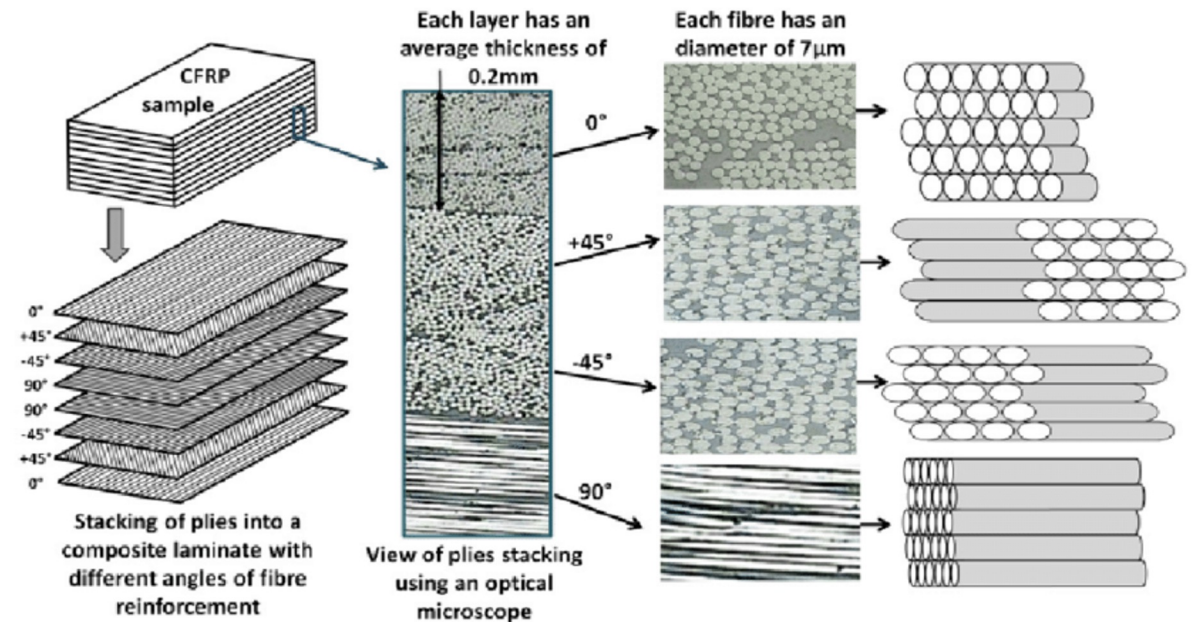
Le manifestazioni più evidenti sono le **tempeste geomagnetiche**, ossia i disturbi temporanei del campo magnetico terrestre e quindi le interazioni tra le particelle cariche del plasma e il sistema termosfera-ionosfera del pianeta.





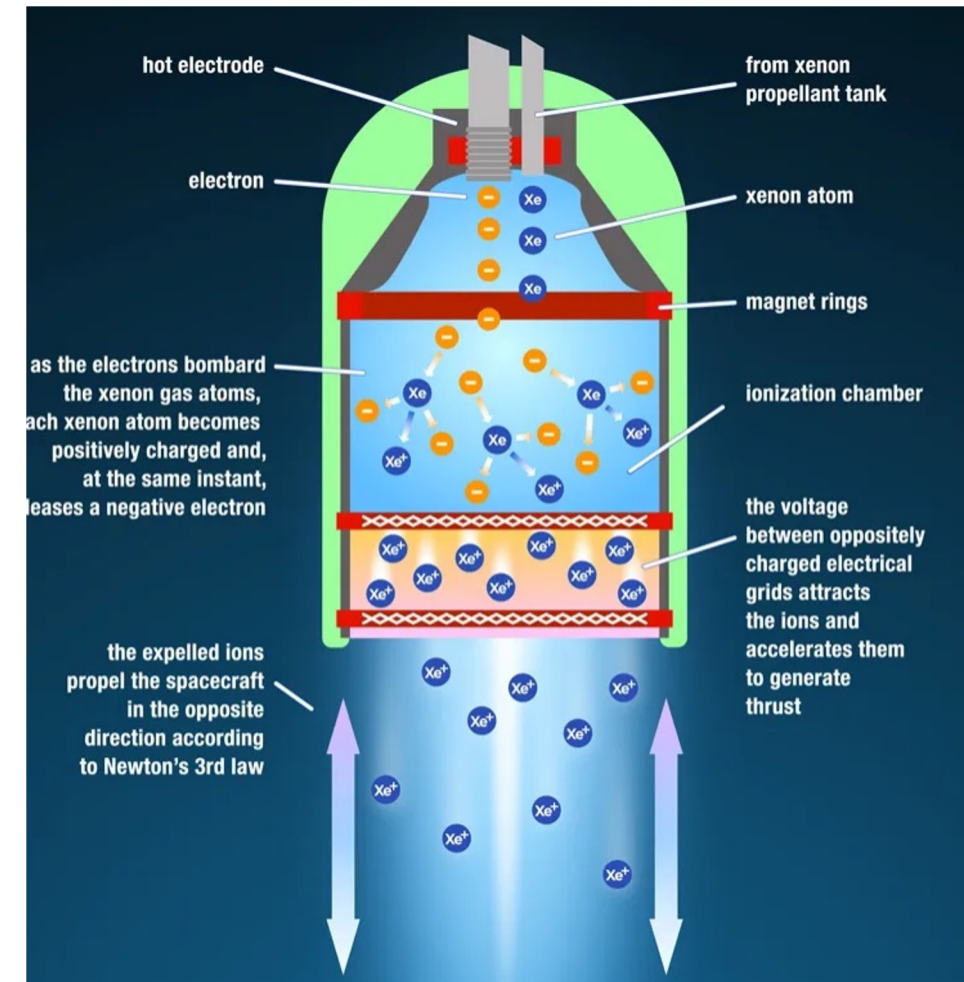
Il plasma trova applicazione nel **settore aerodinamico** sia nello sviluppo di velivoli militari all'avanguardia che nella loro manutenzione e riparazione, poiché la maggior parte richiede che le superfici siano pulite prima di essere verniciate o ricoperte. Viene utilizzato anche per applicare rivestimenti protettivi su componenti aerospaziali così da migliorare la resistenza all'usura ed agli agenti chimici.

Inoltre il trattamento superficiale al plasma aiuta l'industria aerospaziale a sbloccare il pieno potenziale di componenti come i **CFRP (carbon fiber reinforced polymer)** per creare aeromobili più leggeri.



La propulsione spaziale basata sul plasma è una delle tecnologie emergenti più promettenti per il futuro dell'esplorazione. Sono infatti stati impiegati **motori a ioni**, per la loro rilevante efficienza, già all'interno di missioni della NASA quali "Dawn", lanciata nel 2007 per raggiungere i corpi celesti di Cerere e Vesta.

Il plasma può essere utilizzato anche per creare rivestimenti dalle interferenze elettromagnetiche e dai detriti spaziali e numerosi sono infatti i progetti spaziali che si focalizzeranno sullo studio e la ricerca nell'ambito della fisica del plasma.





Attraverso l'analisi dettagliata delle atmosfere planetarie e stellari emerge l'importanza cruciale del quarto stato della materia che si distingue in applicazioni come la fusione nucleare e la propulsione spaziale, ma anche per la sua reattività chimica in processi industriali.

In grado, inoltre, di generare e trasmettere onde elettromagnetiche utili per le comunicazioni spaziali, il plasma si identifica come uno strumento versatile e potente in numerose applicazioni tecnologiche.



È quindi necessaria una maggiore comprensione del plasma non solo per scopi ingegneristici, ma anche per avanzare nella nostra conoscenza dell'universo.

- ❑ Lieberman M. A. e Lichtenberg. A. J. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc. 2005
- ❑ Luhmann Janet G. and Tatrallyay Mariella *Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and Solar Wind Interactions*. American Geophysical Union 1992
- ❑ Wolf, Rory. “Plasma - The Fourth State of Matter ” *Atmospheric Pressure Plasmafor Surface Modification*, Scrivener, 2013, pp. 1-25
- ❑ Wolf, Rory. “Emerging and Future Atmospheric Plasma Applications” *Atmospheric Pressure Plasmafor Surface Modification*, Scrivener, 2013, pp. 205-223
- ❑ Yiğit, Erdal. *Atmospheric and Space Sciences: Ionospheres and Plasma Environments: Volume 2*. Springer; 1st ed. 2018
- ❑ <https://ilbolive.unipd.it/it/news/leccezionale-aurora-boreale-sopra-litalia>
- ❑ <https://science.nasa.gov/solar-system/skywatching/nasa-to-launch-sounding-rockets-into-moons-shadow-during-solar-eclipse/>
- ❑ [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Plato](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato)