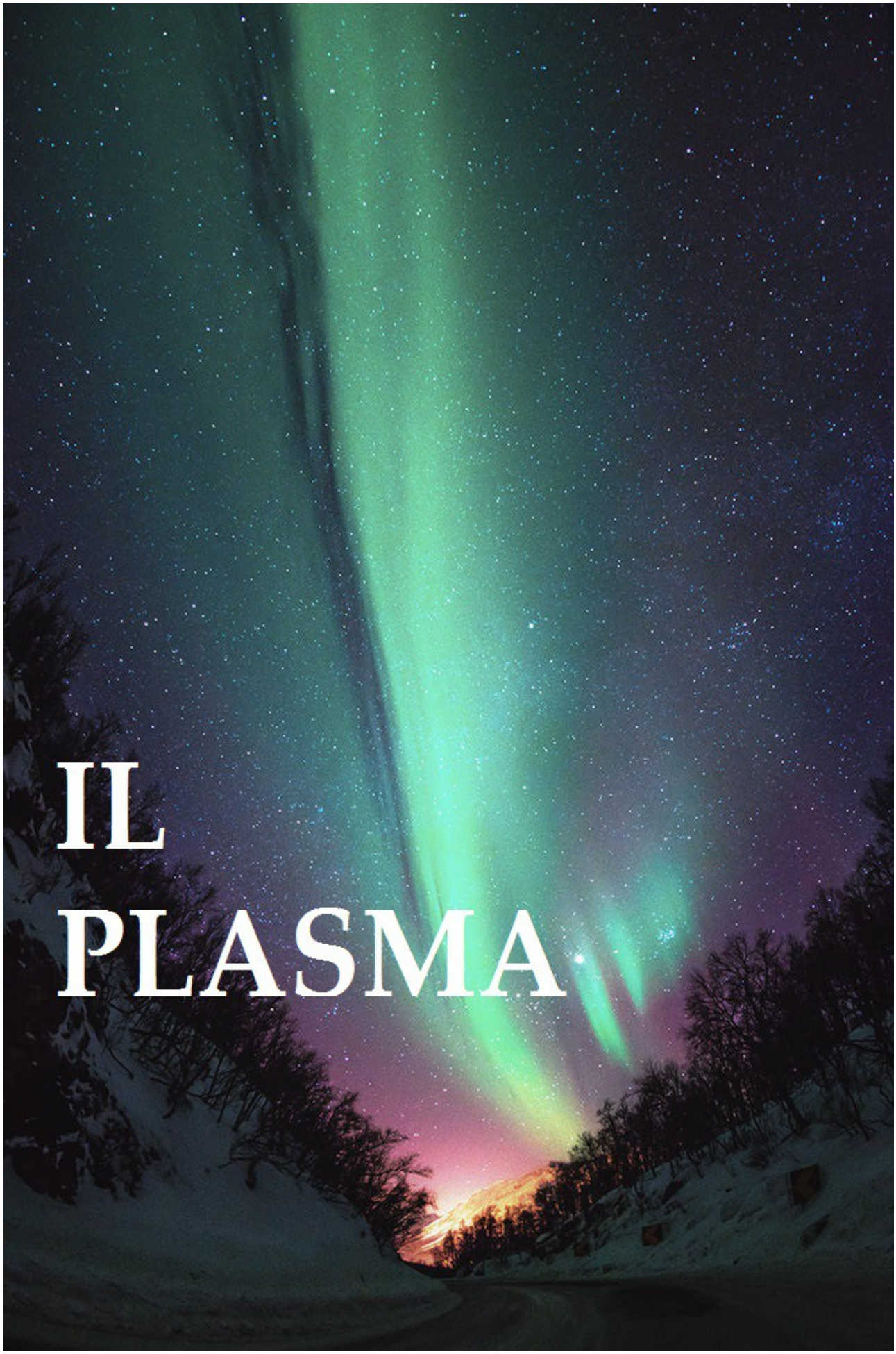


IL PLASMA

Sacchet Stefano
5A
Anno Scolastico 2014/2015
Liceo Scientifico L. Da Vinci, Gallarate

Indice generale

1. IL PLASMA

1. STORIA DEL PLASMA 2
2. CARATTERISTICHE DEL PLASMA 2
3. ORDINI DI GRANDEZZA DEL PLASMA 3
4. VELOCITA' MEDIA DEGLI ATOMI NEL PLASMA 3
5. TEMPERATURA ED ENERGIA DELLE PARTICELLE NEL PLASMA 3
6. LA QUASI NEUTRALITA' DEL PLASMA 4
7. IRRAGGIAMENTO DEL PLASMA 4
8. ALCUNE DIFFERENZE TRA GAS-NEUTRO E PLASMA 5
9. PRODUZIONE DEL PLASMA 5

2. LA FISICA DEL PLASMA

1. LA FUSIONE NUCLEARE 6
2. LA FUSIONE COME FONTE DI ENERGIA 6
3. CONFINAMENTO INERZIALE E MAGNETICO 7
4. PROGETTO ITER 7
5. DEMO 8
6. GENERATORI MHD 9
7. PROPULSORI AL PLASMA 10

3. IL PLASMA NELL'ATMOSFERA

1. I FULMINI 11
2. IONOSFERA (TERMOSFERA) 12
3. AURORE POLARI 13
4. FASCE DI VAN ALLEN 14

4. SPETTROMETRIA DI EMISSIONE SU PLASMA(ICP)

1. PRINCIPI TEORICI 16
2. APPLICAZIONI ALL'ANALISI AMBIENTALE 17

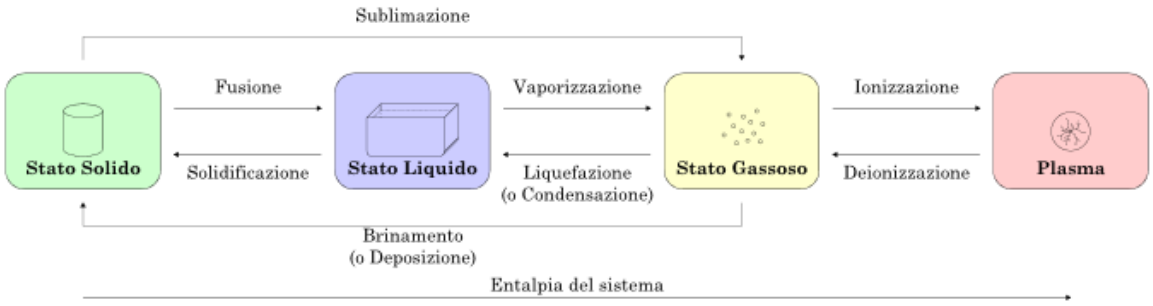
5. BIBLOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. IL PLASMA

STORIA DEL PLASMA

Le prime scoperte sulle proprietà delle scariche elettriche nei gas vengono fatte risalire al leggendario esperimento di Benjamin Franklin, che scoprì la natura elettrica del fulmine: il 15 giugno 1752, a Philadelphia, egli usò come dispositivo un aquilone, legato all'estremità di un filo di canapa. All'altra estremità egli appese una chiave, con un filo di seta per evitare che la corrente andasse alle sue mani, e portò l'aquilone vicino alle nuvole durante un temporale. Egli vide che la chiave si muoveva per effetto dell'accumulo di cariche elettriche, e che poteva caricare con questa una bottiglia di Leida (un tipo di esperienza che egli aveva già effettuato nei suoi studi sull'elettrostatica). Solo dopo un secolo studi più precisi portarono Röntgen alla scoperta dei raggi X attraverso la creazione dei primi tubi da vuoto, i tubi di Crookes , che Sir William Crookes cominciò a studiare negli anni successivi al 1870. Il nome risale al 1923, quando fu proposto dai fisici americani Langmuir e Tonx. Langmuir (premio Nobel nel 1932) studiò l'interazione dei plasmi con le pareti del contenitore nei quali venivano formati. Tuttavia, l'interesse vero e proprio sull'argomento inizia alla fine degli anni cinquanta, quando la Conferenza di Ginevra *"Atoms for peace"* sancisce l'inizio degli studi su uno sfruttamento pacifico della Fusione nucleare.
Contemporanea è la costituzione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA, 1957). Nello stesso periodo cominciano i primi studi sugli effetti di un campo magnetico sui gas ionizzati (per es. della ionosfera) compiuti dal fisico svedese Hannes Alfvén, che lo porteranno a vincere il premio Nobel nel 1970. Questi studi porteranno alla spiegazione del meccanismo delle fasce di Van Allen in termini di moti di ioni ed elettroni.
Ai giorni d'oggi la fisica del plasma è un settore in piena espansione, non solo per quanto riguarda la Fusione nucleare, ma anche per le applicazioni industriali (trattamento di superfici, il taglio al plasma, gli schermi al plasma) e la propulsione spaziale.

CARATTERISTICHE DEL PLASMA



Il plasma è il quarto stato della materia prodotto dalla ionizzazione dello stato gassoso. Distribuito ovunque nell'Universo (e presente anche nello spazio che ci circonda, nella ionosfera, come nella combustione di un carburante, nei tubi al neon, nelle pistole a plasma), forma i gas ad altissima temperatura e pressione presenti nel Sole e nelle stelle ed è il costituente dei gas rarefatti degli spazi interstellari; grazie soprattutto alle ricerche sul plasma si è giunti alla scoperta dell'elettrone. Può essere definito come il "normale" stato di una sostanza scaldata a temperature superiori a 10.000 °C. I motivi principali dell'attuale interesse per il plasma sono sostanzialmente due: il primo, di carattere tecnologico, risiede nel fatto che la conoscenza del suo comportamento è determinante per ricavare energia termica da reazioni termonucleari controllate, cioè per riprodurre, in un plasma ad alta temperatura creato e governato dall'uomo, il sistema di produzione di energia proprio del Sole; il secondo è dato dal suo coinvolgimento nei fenomeni riguardanti lo spazio interstellare e le stelle (ionosfera).

ORDINI DI GRANDEZZA DEL PLASMA

Nella tabella che segue sono riportati gli ordini di grandezza per una serie di plasmi: si ricordi che una temperatura di 1 eV (elettronvolt) corrisponde a circa 11.600 °C e che la densità dell'aria è di circa 10^{25} particelle per metro cubo. Si riconosce subito che la maggior parte dei plasmi sono caratterizzati da alte temperature elettroniche: un fulmine ha quasi 30.000° C.
Si possono produrre anche plasmi a temperatura ambiente, i cosiddetti plasmi freddi, dove gli ioni sono effettivamente a temperatura ambiente, ma gli elettroni hanno una temperatura di qualche elettronvolt.
Si può osservare che i plasmi presenti in natura e in laboratorio si caratterizzano per una grande varietà nella grandezza di questi parametri.

PLASMA	**densità (particelle/m^{-3})**	**temperatura (eV)**	**dimensione (m)**	**frequenza di plasma (Hz)**
gas interstellare	10^6	0.01	10^{19}	10^4
vento solare	10^7	10	10^{11}	3×10^4
corona solare	10^{12}	10^2	10^7	10^7
interno del sole	10^{32}	10^3	7×10^8	10^{17}
plasma termonucleare	10^{20}	10^4	10	10^{11}
fulmine	10^{24}	2	10^3	10^{12}
ionosfera	10^{12}	0.1	10^4	10^7

VELOCITA' MEDIA DEGLI ATOMI NEL PLASMA

Quando un gas viene riscaldato per ottenere plasma, le sue molecole si dissociano in singoli atomi i quali si muovono in modo caotico, entrando eventualmente in collisione tra loro in modo casuale. La **velocità media** di questi atomi è facilmente calcolabile con l'equazione:

$$v = 1,3 \cdot 10^2 \sqrt{T/A}$$

Come era prevedibile la velocità degli atomi è direttamente proporzionale alla temperatura della sostanza. Non così immediata è invece la presenza del numero atomico. Maggiore è il numero atomico, maggiore è il numero di elettroni nell'atomo preso in considerazione, maggiore è l'energia necessaria per ionizzarlo (quindi a parità di temperatura la velocità sarà inferiore rispetto ad un gas di atomi più leggeri). Per atomi pesanti, come può essere il mercurio, la ionizzazione completa avviene solo a temperature di milioni di gradi. Nel suo insieme comunque il gas rimane neutro, perchè la ionizzazione non produce eccessi di cariche.

TEMPERATURA ED ENERGIA DELLE PARTICELLE NEL PLASMA

Il plasma è composto di particelle a temperature diverse. Gli elettroni possiedono un'energia di gran lunga più grande di quella degli ioni, mentre l'energia cinetica degli ioni può essere maggiore di quella degli atomi e delle molecole neutre. La differenza di temperatura è proporzionale alla differenza di massa tra elettroni e ioni. Gli elettroni ricevono energia direttamente dall'immisione di corrente nel gas; gli ioni, invece, ricevono energia dagli urti con gli elettroni veloci, che collidono con loro casualmente.

LA QUASI-NEUTRALITA' DEL PLASMA

Se la concentrazione di particelle cariche non è elevata, allora i campi elettrici da esse generati sono troppo deboli per influire sui loro spostamenti, anche se si sommano tutti i campi. In questo caso i singoli elettroni e ioni sono tra loro indipendenti e quindi ogni particella si muove come se tutte le altre non esistessero. Invece, in un gas ionizzato con un'alta concentrazione di particelle cariche e che occupa un volume piuttosto grande, le cariche in eccesso creano campi elettrici sufficienti a bilanciare i flussi e stabilire una quasi-neutralità. Analizzando la relazione tra l'energia potenziale, corrispondete alla differenza tra il numero di elettroni e di ioni, e l'agitazione termica degli elettroni, si può calcolare il cossidetto **raggio di Debye**. Esso corrisponde al raggio minimo in cui il numero di elettroni e quello degli ioni hanno valori di poco differenti. Analizzando porzioni sempre più piccole di plasma, invece, la differenza tra il numero di elettroni e quello degli ioni diventa via via maggiore. Questo concetto è importante per fornire la definizione stessa di plasma, cioè uno stato in cui il numero i elettroni e degli ioni è talmente elevato che anche la più piccola variazione della componente elettronica rispetto a quella ionica risulta impossibile per i forti campi elettrici che si vengono ad avere. Quindi, il raggio di Debye deve valere più di

$$5\sqrt{T/n}$$

dove T è la temperatura ed n il numero di elettroni.

IRRAGGIAMENTO DEL PLASMA

Per comprendere meglio il processo di irraggiamento nel plasma è utile fare un confronto con l'irraggiamento termico ideale: quello del **corpo nero**, cioè di un corpo che assorbe completamente tutte le radiazioni che lo colpiscono, indipentemente dalla lunghezza d'onda. L'irraggiamento del corpo nero aumenta proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta. Il plasma con una concentrazione elettronica bassa risulta quasi completamente trasparente alle radiazioni comprese nel campo del visibile e dell'ultravioletto. Infatti assorbe molto solamente le onde radio, vale a dire radiazioni con lunghezze d'onda piuttosto lunghe, osservabili solo in presenza di un forte campo magnetico. Per questa ragione, se non si considera la gamma delle radiofrequenze, si può dire che la quantità totale di energia fornita dal plasma (con concentrazione e temperatura costante) all'ambiente, deve crescere proporzionalmente al volume occupato dal plasma stesso.Supponiamo, per esempio, che questo volume abbia forma sferica. In questo caso tutta l'energia irradiata crescerà proporzionalmente al cubo del raggio della sfera di plasma, mentre l'intensità di radiazione emessa da 1 cm^2 di superficie deve aumentare proporzionalmente al rapporto tra il volume e la superficie, vale a dire linearmente con il raggio. Una crescita del genere non può durare fino all'infinito dato che per le leggi fondamentali dell'irraggiamento l'energia emessa dalla superficie di un corpo caldo non può superare il valore dell'energia emessa dalla superficie di un corpo nero. Questo si riferisce non soltanto all'energia totale di radiazione, ma anche all'intensità di radiazione in ogni intervallo spettrale. La causa fisica che porta al rallentamento della crescita dell'intensità di radiazione del plasma sta nel fatto che, per grandi dimensioni dello spazio occupato dal plasma, si comincia a sentire l'influenza dell'assorbimento. L'assorbimento riguarda prima le onde lunghe, e soltanto per valori alti del raggio comincia ad interessare l'intensità delle **onde corte** (ultraviolette ed X) emesse nel plasma. Notiamo, tra l'altro che alla temperatura di 10^8 °C, che si considera come la minima per i reattori termonucleari, la radiazione di 1 cm^2 di superficie di un corpo nero dovrà avere una potenza di $5 \cdot 10^{17}$ kW. Una sferetta di 1 cm di diametro avente questa potenza, posta alla distanza di 1 milione di chilometri dalla Terra, ci invierebbe un flusso di radiazioni (in prevalenza raggi X) superiore a quello che riceviamo dal Sole. I calcoli mostrano però che per concentrazioni di plasma di 10^{16} particelle/cm^3 e alla temperatura di 10^8 °C il plasma non emetterà che un flusso di energia pari a quello di un corpo nero portato alla temperatura di 2.000 °C: quindi una piccola quantità di plasma ad elevata temperatura è una sorgente di radiazioni relativamente modesta.

ALCUNE DIFFERENZE TRA GAS NEUTRO E PLASMA

GAS NEUTRO	PLASMA
PROPRIETÀ: **CONDUCIBILITÀ ELETTRICA**	
Molto bassa • I fenomeni collettivi non sono molto comuni perché i gas neutri sono caratterizzati da forze molecolari che sono a breve raggio.	**Molto alta** • Il campo elettrico in un plasma può essere considerato come nullo. Quando una corrente fluisce nel plasma, c'è una caduta di potenziale (anche se piccola). • La possibilità di condurre corrente elettrica fa sì che il plasma risponda molto bene a campi magnetici, formando una varietà enorme di fenomeni, come filamenti, jets, e strutture coerenti. • Fenomeni collettivi sono molto comuni, perché il plasma è caratterizzato da forze elettromagnetiche che sono a lungo range • Sotto l'azione di un campo elettrico nel plasma si genera una corrente elettrica.
PROPRIETÀ: **INTERAZIONI**	
Binarie Collisioni a due corpi sono la norma.	**Collettive** Ogni particella interagisce contemporaneamente con molte particelle. Le interazioni collettive sono più importanti di quelle binarie.

PRODUZIONE DEL PLASMA

La legge di Paschen stabilisce il legame tra la tensione di "**breakdown**" elettrico che corrisponde alla tensione di innesco di un gas ionizzato, ed il prodotto tra pressione e distanza degli elettrodi. Per esempio, per ionizzare gas Argon in un tubo lungo un metro e mezzo alla pressione di 10^{-2} mbar, occorrono circa 800 V.

La produzione del plasma chiamata "breakdown" elettrico è seguita dalla formazione di luce: per questo si dice che la scarica passa dal regime di *oscur*a a quello *a bagliore (glow)*. Questo passaggio è contrassegnato anche da una brusca diminuzione della tensione applicata ai capi del tubo, in quanto la formazione di cariche libere (elettroni e ioni) riduce di molto la resistenza elettrica del gas. Se a questo punto la tensione ai capi del tubo viene ulteriormente aumentata, la scarica passa dal regime di "*glow*" a quello di *arco*: la luminosità della scarica aumenta ancora, e la tensione subisce un altro brusco calo (come nel passaggio dal regime di *scarica oscura* a quello di *scarica a bagliore*). La corrente di un arco è ancora più elevata di quella di una scarica a bagliore.

Quindi: in un tubo rettilineo un gas ionizzato a seconda della tensione applicata e della corrente presente nel gas attraversa i seguenti regimi:

- Scarica oscura
- Scarica a bagliore(glow)

} → *L'emissione di luce avviene in frequenze caratteristiche*

- Arco → *per ciascun elemento*

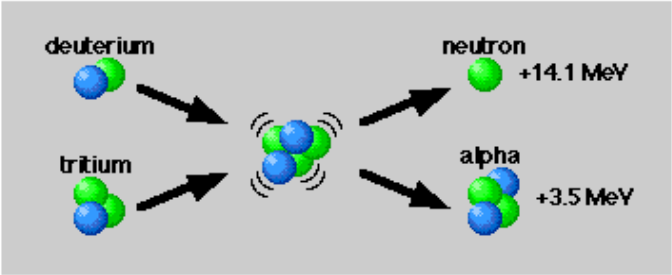
2. LA FISICA DEL PLASMA

LA FUSIONE NUCLEARE

La fusione nucleare è la reazione che avviene nel sole e nelle altre stelle, con produzione di una enorme quantità di energia. Nonostante si stiano studiando vari tipi di reattori a fusione, che verranno successivamente descritti, non è ancora stato possibile utilizzare la fusione per produrre energia in modo controllato.

Come avviene?

Nella reazione di fusione nuclei di elementi leggeri, quali l'idrogeno, a temperature e pressioni elevate, fondono formando nuclei di elementi più pesanti come l' elio. L'idrogeno ha 3 isotopi : l' idrogeno (H), il deuterio(D) e il trizio(T). Il nucleo di tutti e tre contiene un protone, il che li caratterizza come forme dell' elemento idrogeno; il nucleo di deuterio contiene inoltre un neutrone mentre quello del trizio due neutroni. In tutti i casi l' atomo neutro ha un elettrone al di fuori del nucleo per compensare la carica del singolo protone.
La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (particella alfa) e si libera un neutrone. In questa reazione la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti e si verifica liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia. L'energia liberata si distribuisce tra la particella alfa e il neutrone in rapporto inverso alle rispettive masse.



Come nell'immagine sovrastante i nuclei di deuterio e trizio interagiscono a distanze molto brevi (pari alle dimensioni del nucleo: 10^{-14} m). Affinché due nuclei si avvicinino a distanze sufficientemente brevi è necessario che la velocità con cui si urtano sia molto alta; la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) deve essere molto elevata. Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione, ad esempio, è necessario portare una miscela di deuterio e trizio a temperature elevatissime (100 milioni di gradi K) per tempi di confinamento sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte collisioni, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

LA FUSIONE COME FONTE DI ENERGIA

Negli ultimi 60 anni si è cercato di utilizzare la fusione per creare energia elettrica.
Per ottenere in laboratorio la fusione termonucleare controllata, al fine di produrre energia, è necessario riscaldare una miscela di deuterio-trizio a temperature molto alte (100 milioni di gradi, più di sei volte la temperatura all' interno del sole), mantenendola confinata in uno spazio limitato per un tempo sufficiente a che l'energia liberata dalle reazioni di fusione possa compensare sia le perdite, sia l'energia usata per produrlo. L'energia liberata la si utilizza come nel caso della produzione di energia elettrica o del riscaldamento delle abitazioni.

CONFINAMENTO INERZIALE E MAGNETICO

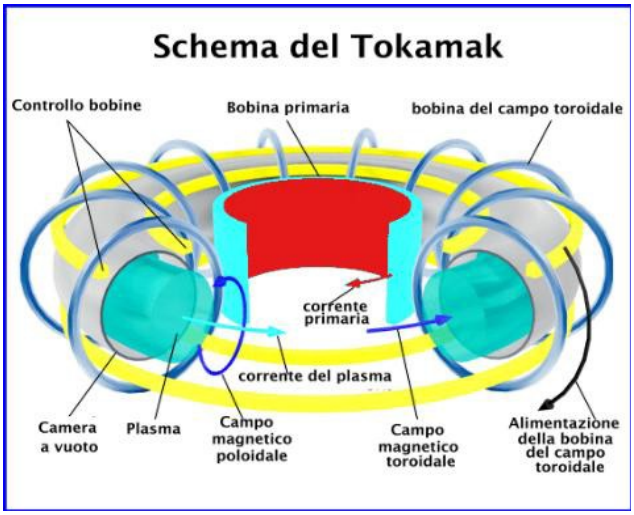
• **CONFINAMENTO INERZIALE**:
Consiste nell' ottenere in laboratorio (vedi immagine a lato) una serie di micro-esplosioni bombardando piccole sferette composte dalla miscela di deuterio-trizio con fasci di luce laser o di particelle ad alta energia. L'energia elettromagnetica di elevata potenza dei fasci laser è trasferita uniformemente alla superficie della sferetta. La superficie della sferetta evapora e, secondo il principio di azione e reazione, il combustibile viene compresso e riscaldato. Si realizza così la condizione di altissima densità del plasma anche se per tempi di confinamento molto brevi.

• **CONFINAMENTO MAGNETICO**:
Il plasma caldo è racchiuso in una camera a vuoto e una opportuna configurazione di campi magnetici esterni (prodotti da correnti circolanti nel plasma) impedisce il contatto con le pareti del recipiente. Sono state studiate diverse configurazioni magnetiche:

1. a specchio, in cui le linee di forza del campo magnetico sono aperte alle estremità del plasma
2. a simmetria toroidale (es. Stellarator, Tokamak).

Quella che ha ottenuto finora i migliori risultati nella fusione a confinamento magnetico, è quella del **Tokamak**.

IL TOKAMAK



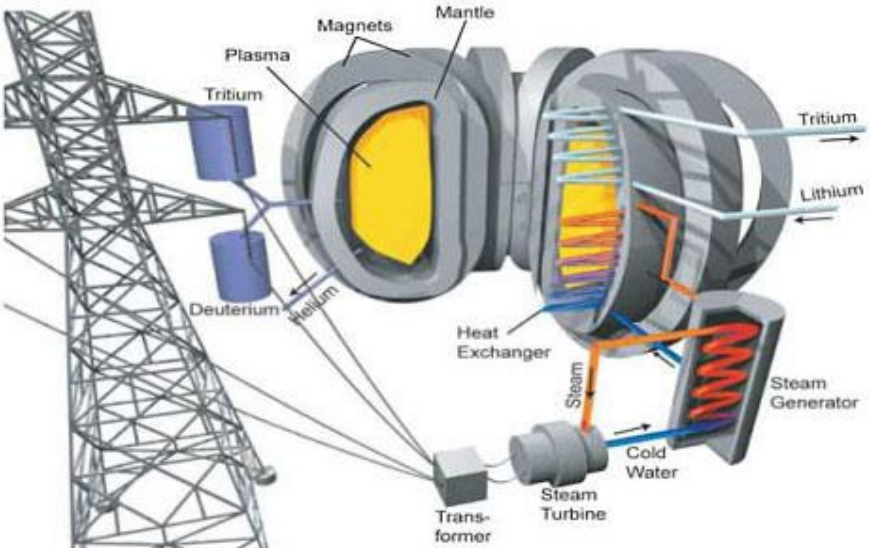
Il Tokamak è un dispositivo di forma toroidale caratterizzato da un involucro cavo, costituente la "ciambella", in cui il plasma è confinato mediante un campo magnetico con linee di forza a spirale. Questa configurazione magnetica è ottenuta mediante la combinazione di un intenso campo magnetico toroidale prodotto da bobine magnetiche poste intorno alla "ciambella", con un campo magnetico poloidale realizzato mediante la corrente indotta nel plasma dall' esterno; quest'ultimo necessario per evitare la deriva delle particelle del plasma verso le pareti del recipiente. Le particelle di plasma si avvitano intorno alle linee di forza del campo. Bobine supplementari esterne occorrono per realizzare campi magnetici ausiliari che controllano la posizione del plasma nella "ciambella". La configurazione tipo Tokamak è comunque particolarmente stabile e permette lunghi tempi di confinamento del plasma.

PROGETTO ITER

ITER (in origine International Thermonuclear Experimental Reactor) è un progetto internazionale che propone di realizzare un reattore sperimentale a fusione nucleare in grado di produrre più energia di quanta ne consumi per l'innesco e il sostentamento della reazione di fusione. In pratica è un reattore a deuterio-trizio in cui il confinamento del plasma è **ottenuto in un campo magnetico all'interno del Tokamak.** La sua costruzione è attualmente in corso a Cadarache, nel Sud della Francia ad opera di un consorzio internazionale composto da Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, India e Corea del Sud. Il costo previsto per il progetto è di 15 miliardi di euro.
Lo scopo principale è il raggiungimento di una reazione di fusione stabile (500 MW prodotti in 60 minuti) approfondendo le attuali conoscenze sulla fisica del plasma. Nel corso della costruzione e dell'esercizio di ITER saranno integrate e collaudate molte delle soluzioni tecnologiche nel campo della criogenia, della superconduttività e delle tecniche di alto vuoto necessarie per il futuro prototipo di centrale elettrica a fusione, denominato DEMO.

DEMO

DEMO è un prototipo di reattore nucleare a fusione studiato in Europa. Gli studi sono iniziati prima del 1995 e proseguiranno fino alla progettazione costruttiva del reattore (prevista verso il 2030). Lo scopo principale del progetto è dimostrare la possibilità di generare energia elettrica tramite la reazione di fusione nucleare. Le caratteristiche del plasma di DEMO devono quindi essere più spinte di quelle del plasma di ITER, cioè tali da mantenere la stabilità della reazione di fusione per un tempo indeterminato. Il consumo di trizio, molto maggiore di quello previsto nell'ITER, richiede la presenza in DEMO di un blanket triziogeno, cioè di una parte di macchina destinata a produrre trizio dalla cattura di un neutrone da parte del litio, in quanto il trizio, ha un periodo di dimezzamento di circa 12 anni.



Per approfondire …

CARATTERISTICHE GENERALI:

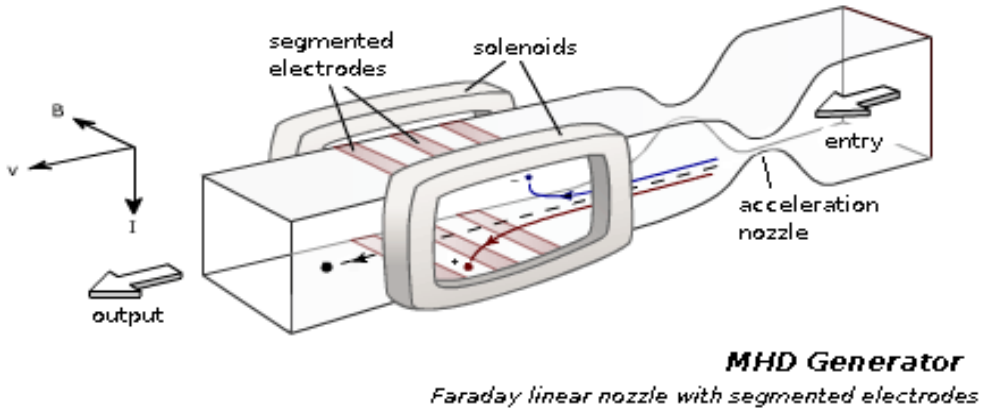
La reazione di fusione in DEMO sarà ottenuta per confinamento magnetico in una macchina tipo tokamak. Dato che nello studio di DEMO sono previsti quattro modelli diversi, sono date le caratteristiche minima e massima previste per i vari modelli.

- Potenza elettrica della centrale (GW) 1,33-1,55
- Potenza generata dalle reazioni di fusione (GW) 2,53-5,00
- Raggio al baricentro del plasma (m) 6,10-9,55
- Raggio interno del plasma (m) 4,1-6,6
- Raggio esterno del plasma (m) 8,2-13,1
- Altezza totale del plasma (m): 8,6-12,3
- Campo magnetico toroidale sull'asse (T) 5,6-7,0
- Efficienza globale dell'impianto 31-60%

GENERATORI MAGNETOIDRODINAMICI (MID)

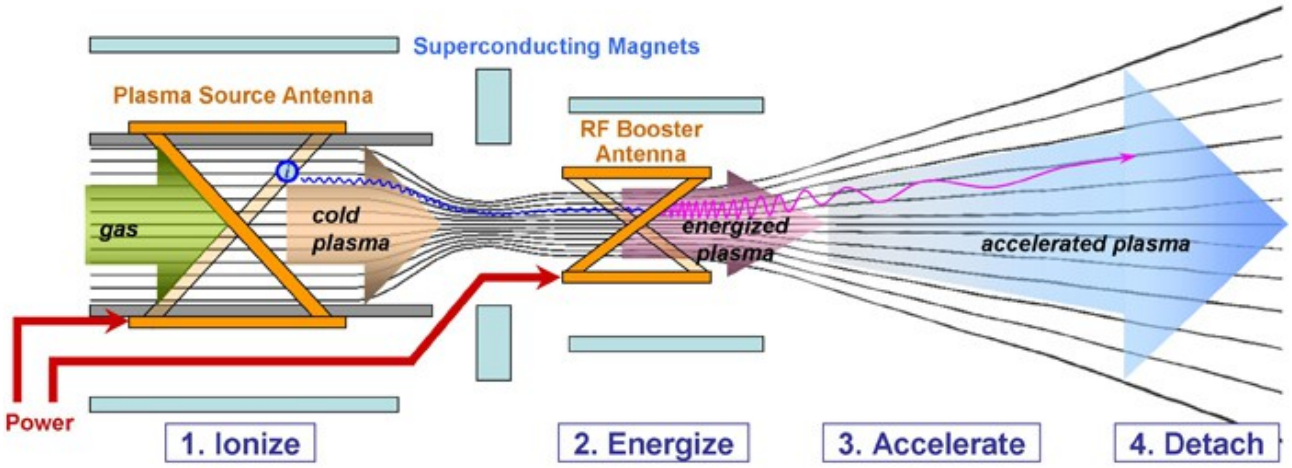
I primi studi atti allo sviluppo di generatori magnetoidrodinamici risalgono a più di mezzo secolo fa, oltre che in Russia, che è dove si è arrivati a costruire impianti di una certa potenza, anche negli Stati Uniti, Cina, Francia, Gran Bretagna ed anche in Italia. Inoltre, negli ultimi vent'anni, dopo circa un decennio di stasi, la ricerca sui generatori MID (MHD in inglese) ha registrato una certa ripresa. Si tratta di una tecnologia il cui sviluppo industriale presenta delle difficoltà per le quali, spesso, le ricerche si sono fermate. Ma, da un lato, la lievitazione dei costi dell'energia dagli anni '80 ad oggi giustifica investimenti assai più rilevanti di quelli che erano considerati accettabili nelle prime fasi di sviluppo, dall'altro le tecnologie, in particolare dei materiali ceramici, si sono sviluppate in maniera così rilevante che è da supporre che alcuni problemi che erano ardui un tempo oggi possano trovare una soluzione relativamente agevole.Vediamo, innanzitutto, cos'è un generatore magnetoidrodinamico.Esso si basa sulla legge di Faraday (1831) – per la quale, quando un conduttore si muove in un campo magnetico in esso è indotta una f.e.m. direttamente proporzionale all'intensità del campo,alla lunghezza del conduttore ed alla sua velocità – e sull'effetto Hall (1880) - per il quale se un conduttore percorso da corrente è immerso in un campo magnetico, trasversalmente sulle sue facce si produce una d.d.p. In questo caso il conduttore è costituito da un flusso di plasma che può essere prodotto in vari modi, che attraversa una camera di geometria e materiale idoneo ed immersa in un intenso campo magnetico; sulle opposte pareti della camera ci sono piastre collettrici dell'elettricità così generatasi. Nei generatori magnetoidrodinamici di cui è nota la realizzazione, il flusso di plasma (che percorre il canale a 650÷1'500 m/s – da due ad oltre quattro volte la velocità del suono) è stato ottenuto per combustione soprattutto di gas naturale o di gasogeno, od eventualmente olio combustibile, o polverino di carbone, preferibilmente con ossigeno. Combustibile e comburente sono preriscaldati, e la temperatura del plasma può essere ulteriormente incrementata mediante un arco elettrico, così da raggiungere temperature di almeno 2'500÷4'000°C, alle quali si manifesta un certo grado di ionizzazione del gas.Si nota che il plasma potrebbe essere generato anche per tramite di reazioni nucleari (es.fusione) convenzionali od anche delle innovative reazioni nucleari a debole energia. Solo per tramite del dispositivo descritto, il “canale MHD”, si può avere un rendimento elettrico del sistema del 40% o più. Ponendo in uscita ad esso un generatore di vapore collegato ad una turbina – dato che la temperatura del gas uscente è comunque ancora molto alta, si riesce a recuperare un ulteriore 40% sull'energia in ingresso come elettricità, per cui, sommando, è possibile teoricamente arrivare anche al 90% e forse più di rendimento elettrico. In pratica, attualmente, si è arrivati fino al 58% circa.Per confronto, una centrale termoelettrica tradizionale arriva ad un rendimento elettrico del 42%, che sale al 46% nei tipi più moderni. Si nota inoltre che partendo, ad esempio, dalla gassificazione dei rifiuti – processo che genera, come noto, un gas che può essere contaminato da prodotti anche molto tossici (es. aromatici clorurati), il gas prodotto verrebbe bruciato a temperature altissime che distruggerebbero le specie tossiche, ed il plasma generato potrebbe efficacemente alimentare un sistema quale quello descritto. Il punto più delicato del sistema, è il canale MHD attraversato dal plasma, che erode profondamente i materiali con cui viene a contatto, in particolare quando esso è lanciato a grande velocità. Uno dei materiali refrattari più resistenti oggi diffusi industrialmente, e che può essere impiegato per questo, è l'ossido di zirconio sinterizzato (AZS). Si è usato anche il nichel, ma la configurazione che ha dato migliori risultati è stata quella di elementi in nichel (agenti anche da collettori) alternati ad elementi ceramici. La vita dei canali sinora impiegati è variata da un minimo di 100 ore alle 1000 ore ed oltre per i progetti russi più avanzati. Dato che alle temperature indicate il gas è ancora poco ionizzato, si applica l'accorgimento di aumentarne artificialmente il numero di ioni presenti disperdendo nel flusso sali di potassio o cesio (tecnica definita “disseminazione”), che – naturalmente – sono recuperati in uscita assieme alle polveri che un simile processo può produrre. Il cuore del sistema è, appunto, il canale MHD, che può avere varie geometrie.

La più semplice è di un condotto rettangolare; più diffusa è quella “a coda di rondine”; talvolta è stata usata una geometria circolare anziché lineare, quale il tipo “a vortice” ed il tipo “radiale”, in cui ioni, molecole ed atomi compiono, anziché una traiettoria più o meno rettilinea, una traiettoria curvilinea. Anche la disposizione delle piastre collettrici ed il loro collegamento può avere diverse configurazioni, per cui abbiamo canali a coda di rondine con elettrodi segmentati del tipo “di Faraday” o “di Hall”.



PROPULSORI A PLASMA

Gli acceleratori del plasma potrebbero trovare la loro applicazione nella tecnologia dei voli cosmici a grande distanza. L'uso di propulsori al plasma, rispetto agli attuali motori a reazione funzionanti a combustibile chimico, permetterebbe di ridurre la quantità, in volume, di combustibile necessario per sviluppare una data trazione. La trazione assicurata dal propulsore è mv, dove m è la massa della materia espulsa dal getto reattivo in 1 secondo e v è la velocità del getto. Quindi per una trazione data, il consumo di carburante è inversamente proporzionale alla velocità v. Ciò permetterebbe quindi di compiere distanze maggiori e entro certi limiti una maggiore manovrabilità della navicella.



3. IL PLASMA NELL'ATMOSFERA

I FULMINI

I fulmini sono delle scariche elettriche improvvise e violente che si verificano nell'atmosfera, tra due nubi oppure tra una nube e la superficie terrestre a causa di differenze di potenziale molto elevate. Il fenomeno si manifesta con un effetto luminoso (lampo) ed uno sonoro (tuono) che non vengono percepiti simultaneamente dall'osservatore a causa delle diverse velocità di propagazione della luce (300.000 Km/s) e del suono (340 m/s). Il lampo viene visto pertanto quasi istantaneamente, mentre il tuono viene udito dopo un intervallo di tempo tanto più grande quanto più è distante il fulmine. Il fulmine può essere anche definito come una colonna di gas ionizzato (plasma), con le seguenti caratteristiche fisiche:

Grandezza fisica	**Valore**
Corrente elettrica	2 -200 kA
Temperatura elettronica	50.000 K
Diametro della colonna di plasma	10-50 cm
Carica elettrica totale	5 - 10 C

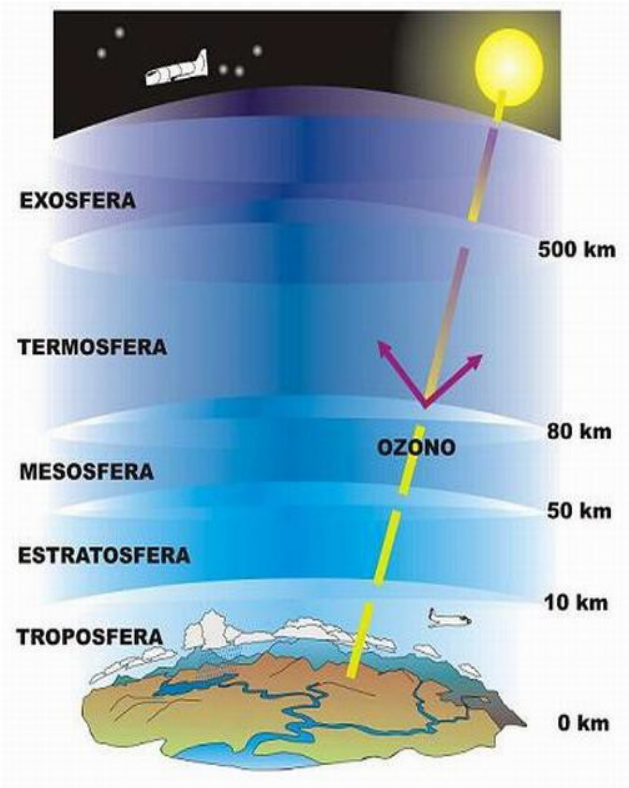
Tipi di fulmine:

- **negativo discendente**, la scarica pilota ha carica negativa e parte dall'alto.
- **positivo discendente**, la scarica pilota ha carica positiva e parte dall'alto.
- **negativo ascendente**, la scarica pilota ha carica negativa e parte dal basso.
- **positivo ascendente**, la scarica pilota ha carica positiva e parte dal basso.

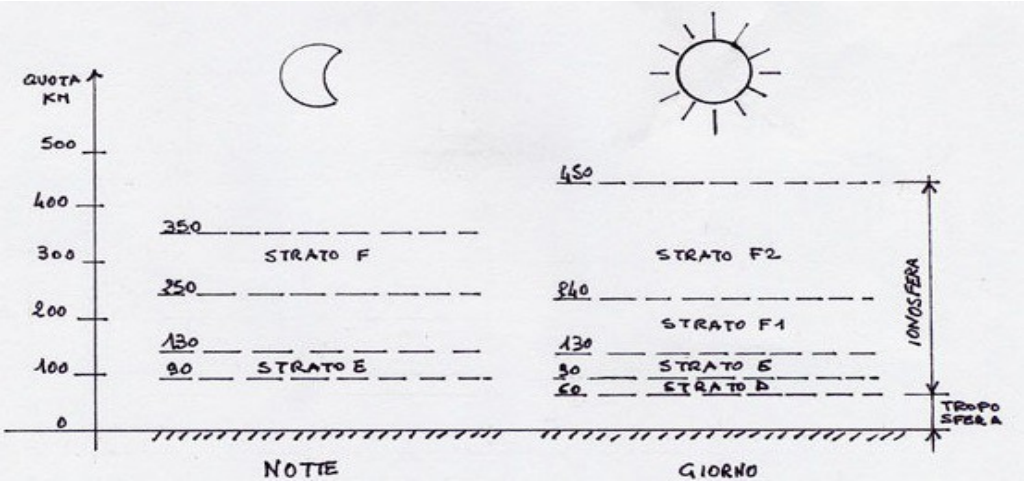
La velocità è variabile e dipende sia dalle condizioni di umidità che dalla differenza di potenziale della scarica, ma si muove tra i 40.000 e i 50.000 km/s.

IONOSFERA (TERMOSFERA)

Con il termine *ionosfera* si intende convenzionalmente la regione dell'alta atmosfera, che si estende da 50 a 1000 km circa sopra la superficie terrestre, in cui la densità di elettroni e ioni liberi raggiunge valori fisicamente rilevanti, cioè tali da influenzare **l'indice di rifrazione** delle onde elettromagnetiche.
La presenza nell'alta atmosfera terrestre di elettroni e ioni liberi è dovuta principalmente al fatto che i gas che la costituiscono sono continuamente sottoposti all'azione ionizzante della radiazione solare UV e X. Oltre all'azione ionizzante del Sole, che fornisce il massimo contributo, bisogna considerare anche i raggi cosmici che, seppur in minima parte, sono causa anche loro della presenza di elettroni e ioni liberi nell'atmosfera: è a causa della sua estrema sensibilità nei confronti di fenomeni atmosferici di vario tipo che la ionosfera può essere utilizzata come un sensibile indicatore di variazioni atmosferiche.



Struttura della ionosfera



La ionosfera è divisa in regioni ionosferiche, ognuna delle quali è caratterizzata da un determinato grado di ionizzazione che cambia alle varie altezze in misura al ciclo d'attività solare, con il tempo (variazione diurna e stagionale), con la località geografica (medie latitudini, zone polari e equatoriali), con le condizioni geomagnetiche e in concomitanza di alcuni disturbi solari, geomagnetici e atmosferici. Procedendo dal basso verso l'alto, le regioni osservate sono D, E, F.

- La regione D, a circa 50-80 km di altezza dal suolo, con densità elettronica massima di circa 10^3 elettroni/cm^3 (densità diurna in condizioni di media attività solare), è presente essenzialmente nelle ore in cui è visibile il Sole, in quanto la sua densità elettronica durante la notte scende a valori che sono circa un centesimo di quelli diurni; è su di essa che si opera la riflessione delle onde lunghe. Questa regione viene prodotta essenzialmente per **ionizzazione di ossido di azoto** da parte della radiazione solare Lyman α dell'idrogeno, di lunghezza d'onda 1216 Å.

• La regione E (o di Kennelly-Heaviside), a circa 80-150 km di altezza dal suolo, con densità elettronica massima di circa $5 \cdot 10^5$ elettroni/cm^3, ha anch'essa, come la regione D, carattere essenzialmente diurno; su di essa si opera la riflessione delle onde medie e medio-corte e si forma prevalentemente per **ionizzazione dell'ossigeno molecolare**, a opera della radiazione X solare.
• La regione F (o di Appleton), la più alta (150-500 km di altezza) e la più ionizzata (sino a circa 10^6 elettroni/cm^3), ha carattere permanente, cioè è presente con notevole densità elettronica anche nelle ore notturne; durante le ore diurne si presenta quasi sempre divisa in due sottoregioni, denominate strato F1 (a circa 200 km di altezza, con densità elettronica massima fino a $5 \cdot 10^5$ elettroni/cm^3) e strato F2 (più alto e più ionizzato). La regione F è di gran lunga la più importante della ionosfera, soprattutto nei riguardi della radiopropagazione, poiché è su di essa che si opera la riflessione delle onde corte e cortissime che permettono i radiocollegamenti a grande distanza. La sua formazione avviene essenzialmente per **la ionizzazione dell'ossigeno atomico e dell'azoto sotto l'azione della radiazione ultravioletta solare di lunghezza d'onda inferiore a 900 Å.**
• Accanto a queste quattro regioni 'normali', si presenta talvolta una regione sottile, vicino alla regione E, detta perciò strato E sporadico (simbolo E_s), le cui caratteristiche generali sono estremamente irregolari.

COS'È IL PLASMA IONOSFERICO
Il plasma ionosferico è un gas ionizzato generato nell'atmosfera al di sopra di 80 km circa (ionosfera). Essa è caratterizzata da una densità gassosa così bassa che gli elettroni e gli ioni positivi, generati per fotoionizzazione dei vari componenti atmosferici (O_2, N_2, NO, O) da parte della radiazione ultravioletta e dai raggi X di origine prevalentemente solare, riescono a sopravvivere per tempi relativamente lunghi prima di subire il processo inverso di ricombinazione. I gas ionizzati sono descritti nelle regioni della ionosfera precedentemente trattate.
COS'È L'INDICE DI RIFRAZIONE
L'indice di rifrazione di un materiale è una grandezza dimensionale che quantifica la diminuzione della velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica quando questa attraversa un materiale.

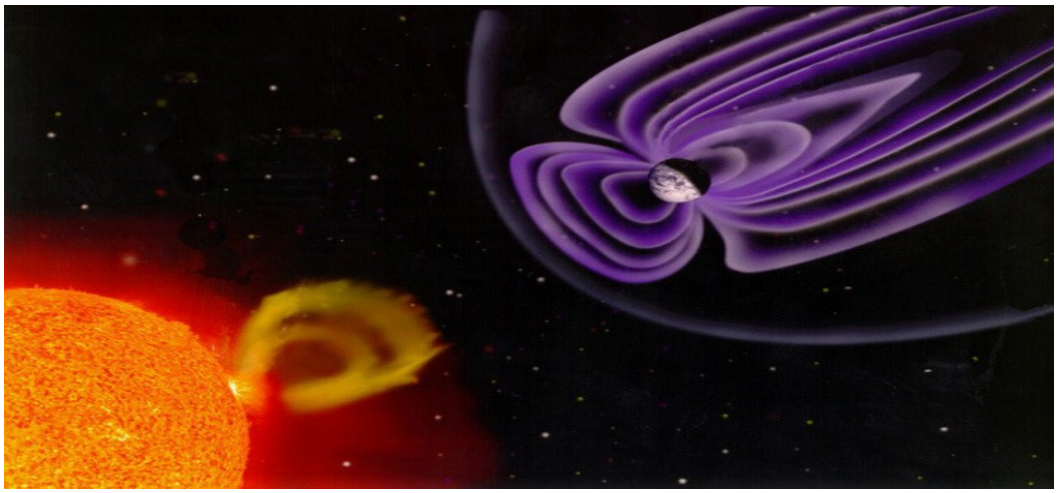
AURORE POLARI

L'aurora polare è un fenomeno che si può osservare nell'alta atmosfera, normalmente al di sopra del settantacinquesimo grado di latitudine, ma a volte si estende fino a latitudini medie.
Le aurore polari si manifestano contemporaneamente nei due emisferi e prendono nome di **aurora boreale** nell'emisfero nord e di **aurora australe** nell'emisfero sud. La forma di un'aurora polare è molto varia. Archi e brillanti raggi di luce si formano a 100 km sopra la superficie terrestre e si estendono verso l'alto lungo il campo magnetico, per centinaia di chilometri. Gli archi possono essere molto sottili, anche solo 100 metri, pur estendendosi da orizzonte ad orizzonte. Possono essere immobili e ad un certo punto iniziare a muoversi e a torcersi. Dopo la mezzanotte, l'aurora può prendere una forma a macchie e ognuna delle macchie spesso lampeggia più o meno ogni 10 secondi fino all'alba. **Oltre a produrre luce, le particelle energetiche che formano l'aurora portano calore.** Questo è dissipato come radiazione infrarossa o trasportato via dai forti venti dell'alta atmosfera.

L'origine dell'aurora si trova a 149 milioni di km dalla Terra, cioè sul Sole. Le particelle energetiche emesse dal Sole viaggiano nello spazio formando il vento solare. Questo si muove attraverso lo spazio interplanetario, verso la Terra, con delle velocità tipicamente comprese tra i 400 e gli 800 km/s, trascinando con sé parte del campo magnetico solare (campo magnetico interplanetario).
Il vento solare, interagendo con il campo magnetico terrestre detto anche magnetosfera, lo distorce creando una sorta di "bolla" magnetica, di forma simile ad una cometa. La magnetosfera terrestre funziona come uno scudo, schermando la Terra dall'impatto diretto delle particelle cariche (plasma) che compongono il vento solare.
In prima approssimazione queste particelle "scivolano" lungo il bordo esterno della magnetosfera (magnetopausa) e passano oltre la Terra. In realtà, a causa di un processo noto come riconnessione magnetica (tra il campo magnetico interplanetario e quello terrestre), il plasma del vento solare può penetrare dentro la magnetosfera e, dopo complessi processi di accelerazione, interagire con la ionosfera terrestre (dove i gas sono rarefatti), con ossigeno a azoto, dando luogo al fenomeno delle aurore. Le aurore sono più intense quando sono in corso tempeste magnetiche causate da una forte attività delle macchie solari. Le aurore polari si formano prevalentemente ad un altitudine di 100 km sopra la superficie terrestre.
Sono in genere visibili nelle regioni vicine ai poli, ma possono occasionalmente essere viste molto più a sud, fino a 40° di latitudine. Le particelle che si muovono verso la Terra colpiscono l'atmosfera attorno ai poli formando una specie di anello, chiamato **l'ovale aurorale**. Questo anello è centrato sul polo magnetico (spostato di circa 11° rispetto dal polo geografico) ed ha un diametro di 3000 km nei periodi di quiete, per poi crescere quando la magnetosfera è disturbata.
Gli ovali aurorali si trovano generalmente tra 60° e 70° di latitudine nord e sud.

Fasce di Van Allen

La **fascia di van Allen** è un insieme di particelle cariche (plasma) trattenute dal campo magnetico terrestre per effetto della **forza di Lorentz**. Quando la fascia è eccitata, alcune particelle colpiscono l'alta atmosfera e danno luogo a una fluorescenza nota come **aurora polare**.
La fascia di van Allen è costituità da due fasce che circondano il nostro pianeta, una interna ed una più esterna. Le particelle cariche sono distribuite in maniera tale che la fascia interna sia composta principalmente da protoni, mentre quella esterna da elettroni.
Le fasce di van Allen sono il risultato della collisione del vento solare con il campo magnetico terrestre. Le particelle elettrocariche vengono respinte dalle regioni dove il campo magnetico è più intenso, ovvero quelle polari, e continuano a rimbalzare in direzione nord-sud nelle zone tropicali ed equatoriali. La separazione fra la fascia interna e quella esterna è causata dalla presenza di onde radio a bassa frequenza che respingono le eventuali particelle che potrebbero venirsi a trovare in tale regione. Tempeste magnetiche particolarmente intense possono spingere delle particelle cariche in questa zona, ma entro pochi giorni l'equilibrio viene ristabilito.



COS'È LA FORZA DI LORENTZ

La forza di Lorentz, il cui nome è dovuto al fisico olandese Hendrik Lorentz, è la forza che si sviluppa tra un oggetto carico elettricamente ed il campo elettromagnetico. Si tratta della forza subita da una carica che si muove in un campo magnetico e/o in un campo elettrico.

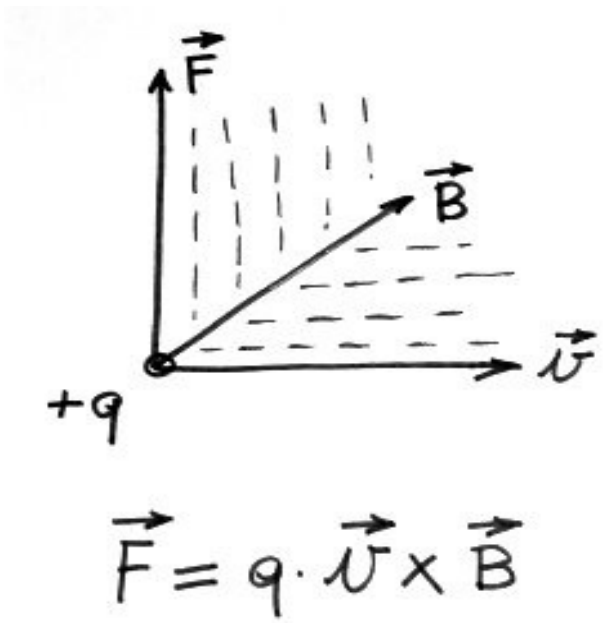
Una particella carica (q) in moto con velocità (v) i presenza di un campo magnetico B subisce una forza:

F (N) = q (c) · v (m/s) · B (Tesla)

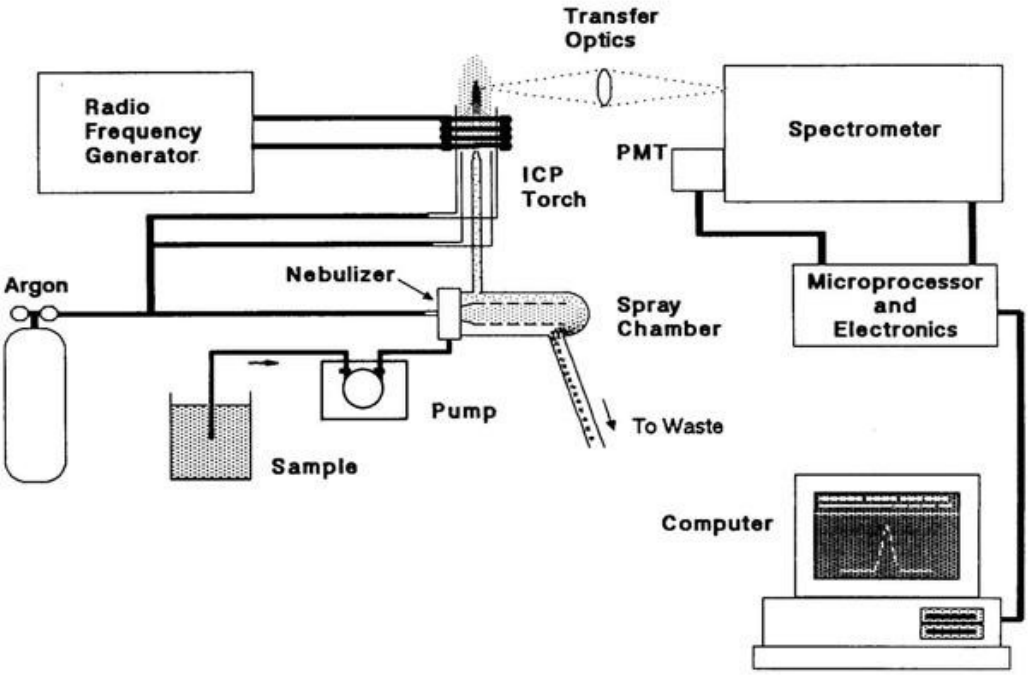
Il modulo di tale forza è:

|F| (N) = q (c) · v (m/s) · B (Tesla) · sen α

La F è sempre perpendicolare al piano individuato dalle direzioni di v e B. La direzione di F si trova con la regola della mano destra.



4. SPETTROMETRIA DI EMISSIONE SU PLASMA (ICP)



Un gas allo stato di plasma ad elevata temperatura (circa 10.000 C°), può essere usato come mezzo di eccitazione molto efficace per una tecnica di analisi in emissione di molti elementi chimici, detta **spettrometria di emissione su plasma (ICP).**

PRINCIPI TEORICI

L'impiego a fini analitici delle sorgenti a "**plasma indotto a radiofrequenza**" o "**plasma accoppiato induttivamente ICP** (Inductively Coupled Plasma), è piuttosto recente e ha permesso di rivalutare le tecniche spettrometriche in emissione.
La scarica ICP è prodotta per azione di una bobina di eccitazione (solenoide) a radiofrequenze (generalmente 27 Mhz), che circonda un tubo di quarzo attraverso cui fluisce una corrente di argon. Il campo di radiofrequenze genera un campo magnetico variabile, all'interno della bobina, che induce in un mezzo conduttore, in questo caso argon ionizzato, delle correnti indotte. Il risultato è il forte riscaldamento di quest'ultimo per "effetto Joule".
L'argon usato per alimentare la sorgente al plasma, naturalmente a temperatura ambiente, non è ionizzato ma per attivare il processo continuo di formazione del plasma, si usa all'inizio, una scarica elettrica ad arco o a scintilla.
Una volta ionizzato, il campo a radiofrequenze può espletare la sua azione generando uno stato di plasma in una zona ristretta situata al di sopra del tubo di quarzo (1-3 cm dall'imboccatura). La scarica ICP, è molto stabile e raggiunge temperature dell'ordine dei 10.000 °C per potenze di corrente impegnate di 2 kW. I campioni da analizzare possono essere liquidi puri o solidi allo stato di polveri a causa delle alte temperature ottenibili con questo mezzo di eccitazione; tuttavia anche in questa tecnica si preferisce solubilizzare i campioni in un solvente e nebulizzarli trasformandoli in un aerosol finissimo che viene iniettato al centro della scarica. Alle temperature della scarica al plasma, le sostanze contenute nel campione si trasformano in atomi allo stato fondamentale (atomizzazione), e questi ultimi quindi subiscono un' eccitazione.

Il processo di atomizzazione dei composti nebulizzati nel plasma ICP, qualunque sia la loro natura chimica,risulta praticamente completo.
Rispetto alla tecnica di emissione su fiamma, quella basata sulla scarica ICP, considerate le elevate temperature raggiungibili, presenta, insieme ad altri vantaggi, soprattutto quello di riuscire ad eccitare e **far emettere una percentuale di atomi decisamente superiore**; la sensibilità di questa tecnica risulta quindi decisamente migliore. Alle temperature del plasma si eccitano anche gli atomi degli elementi che in fiamma emettono con difficoltà e in misura irrilevante a causa dei loro alti valori di potenziale di ionizzazione (As, Si,V, ecc..).

APPLICAZIONI ALL'ANALISI AMBIENTALE

La tecnica di emissione su plasma ICP consente di ottenere ottimi risultati nell'analisi quantitativa di molti elementi con limiti di rilevabilità confrontabili o in certi casi, decisamente migliori, di quelli ottenibili con la tecnica dell'A.A. con fornetto di grafite.
Le applicazioni sono pertanto le stesse elencate per la tecnica dell'A.A. e dell'emissione su fiamma.
Vanno peraltro sottolineate alcune caratteristiche estremamente positive proprie di questa tecnica:

- rapidità di esecuzione delle determinazioni;
- possibilità di analisi di molti elementi presenti nello stesso campione, in modo simultaneo;
- sequenziale a scansione (basta pensare al fatto che in A.A. occorre cambiare la lampada HCL per ogni elemento da determinare e attendere che le loro emissioni vadano a regime);
- grande sensibilità delle misure;
- elevato intervallo di linearità di risposta che consente di analizzare direttamente nella stessa soluzione, senza effettare fastidiose diluizioni; elementi presenti al livello di tracce (parti per miliardo) insieme ad elementi presenti invece a livello di decine o addirittura, centinaia di ppm.

Forse l'unico aspetto negativo di questa tecnica, è quello legato all'alto costo di questi spettrometri.

SITOGRAFIA E BIBLIOGRAFIA

- http://www.fusione.enea.it/

Fusione termonucleare, Tokamak, Confinamento, Progetti ITER e DEMO
- http://ronde88.altervista.org/

Lampada al plasma
- http://www.sapere.it/

Definizione e caratteristica del plasma
- http://roma2.rm.ingv.it/

Ionosfera, Fasce di Van Allen
- http://digilander.libero.it/

Aurore Polari
- http://wikipedia.it/

Schermo al plasma, Fulmini, Produzione del Plasma, Ordini di grandezza del Palsma
- **Spettrochimica di emissione sul Plasma –** PDF

Generatore magnetoidrodinamico
- **Generatori_Magnetoidrodinamici_MHD_una_fonte_alternativa_di_elettricità -** PDF

Definizione e fisica elementare del plasma
- Fisica elementare del plasma, L. Arcimovic