

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Propulsione basata su ioni:
un confronto tra le principali
tecnologie»***

Tutor universitario:

Prof.ssa Roberta Bertani

Padova, 25/11/2022

Laureanda: *Lisa Lazzarini*

mat. 1189383

La propulsione ionica è un tipo di propulsione elettrica che permette di creare una spinta a partire dall'accelerazione degli ioni. I propulsori ionici si differenziano in base al modo in cui accelerano gli ioni.

Elettrostatici → Forza di Coulomb

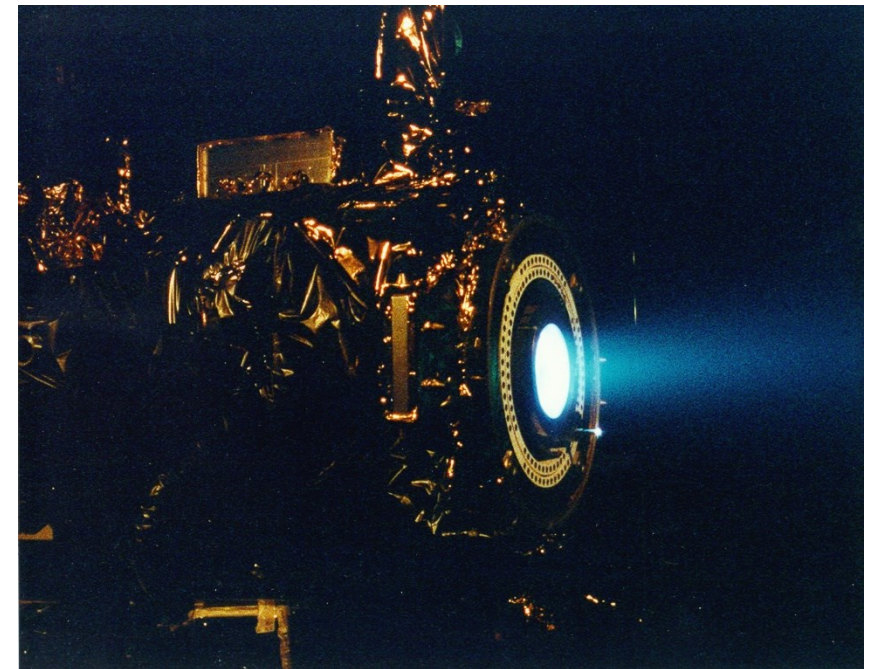
Elettromagnetici → Forza di Lorentz

La spinta è molto piccola in confronto ai razzi chimici, ma si ottiene un impulso specifico molto elevato.

A causa delle loro necessità energetiche relativamente elevate vengono considerati convenienti solamente per applicazioni di propulsione spaziale.

Principi della propulsione ionica → Hermann Oberth in "Wege zur Raumschiffahrt" ("Modi di volo spaziale") trattò la necessità di riduzione della massa per i propulsori elettrici e l'accelerazione elettrostatica di gas ionizzati.

Il primo propulsore ionico funzionante fu costruito nel 1959 all'interno del Glenn Research Center (NASA). Durante gli anni '60 seguirono i test suborbitali del motore e nel '64 venne mandato in volo suborbitale sulla SERT-1.



Il modello di propulsore ionico elettrostatico accelera gli ioni nella direzione del campo elettrostatico tramite forze elettrostatiche (Coulomb) utilizzando degli elettrodi ad alto voltaggio.

Furono inizialmente sviluppati dalla NASA nei primi anni sessanta ma non vennero praticamente utilizzati fino agli anni novanta. Un esempio funzionante è il motore NSTAR, che è stato in funzione per 3 anni sulla sonda Deep Space 1 lanciata nel 1998 con lo scopo di testare nuove tecnologie tra cui il suddetto motore.

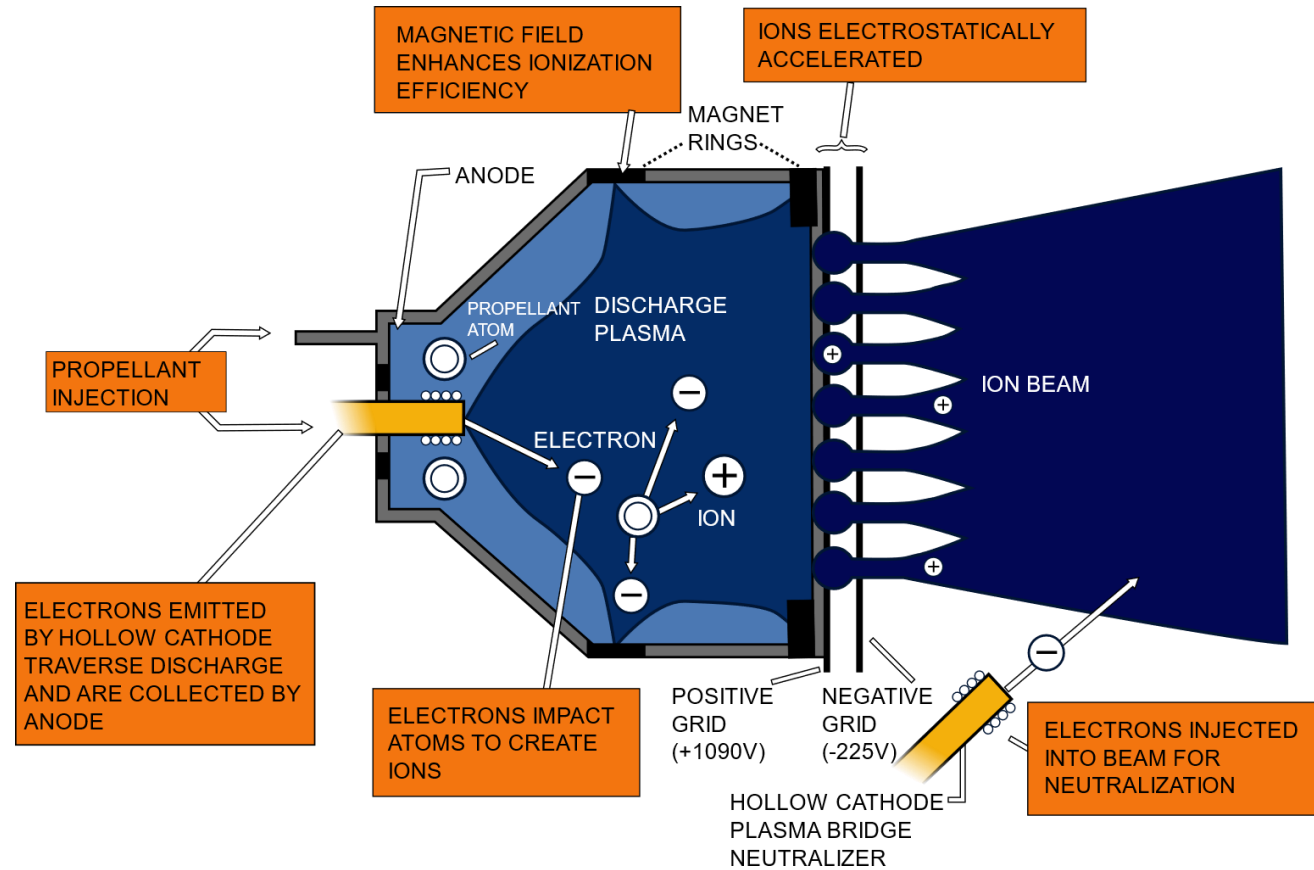
Attualmente si sta lavorando ad HiPEP.

Tipici esempi di propulsori elettrostatici sono:

- Propulsori a **griglia elettrostatica**
- Propulsori a **effetto Hall**
- Propulsori ad emissione di campo (**FEEP**).



1. **Iniezione** degli atomi di propellente nella camera di propulsione. Tramite la ionizzazione si ottengono ioni positivi.
2. Per effetto della diffusione gli ioni **migrano** verso l'uscita della camera di propulsione e fuoriescono.
3. Gli ioni entrano in un involucro di plasma tra le griglie positive e negative all'uscita della camera e sono sottoposti ad una differenza di potenziale che causa **un'accelerazione**.
4. Gli ioni positivi sono attirati verso la griglia negativa e nel momento in cui gli ioni si avvicinano alla griglia negativa vengono attirati verso le aperture e fuoriescono nello spazio con una velocità elevata. Questa espulsione creerà la **spinta**.

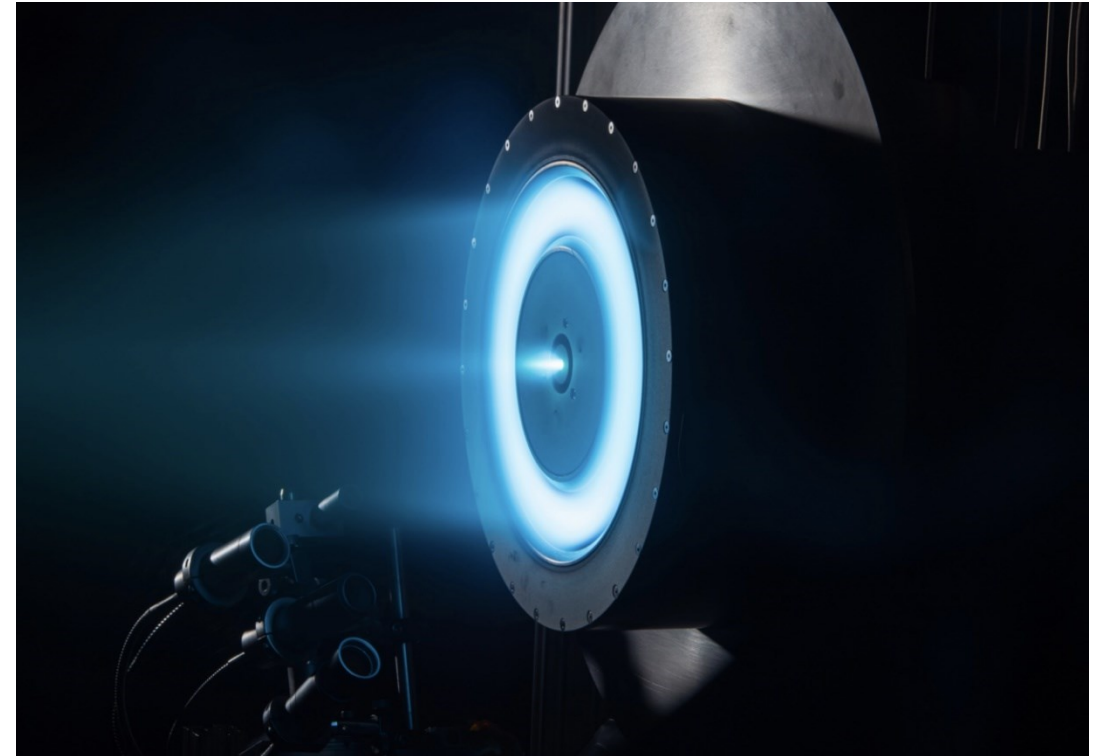


Il problema principale è la progressiva **riduzione dell'efficienza** e della durata del motore a causa dell'erosione delle ottiche ioniche.

Il vantaggio dei propulsori ionici a griglia elettrostatica è **l'impulso specifico elevato**. Supera la maggior parte delle altre tecnologie arrivando ad un impulso di 30-100 kNs/kg con un'accelerazione degli ioni che sfiora i 100 km/s.

Per bypassare la limitazione di circa 5kV sul differenziale di carica tra le griglie si decise di sostituire la classica coppia di griglie ad alto e basso voltaggio con due coppie di griglie.

Altri vantaggi di questo nuovo motore includono sicuramente la possibilità di essere ingrandito, ottenendo quindi spinte più elevate.

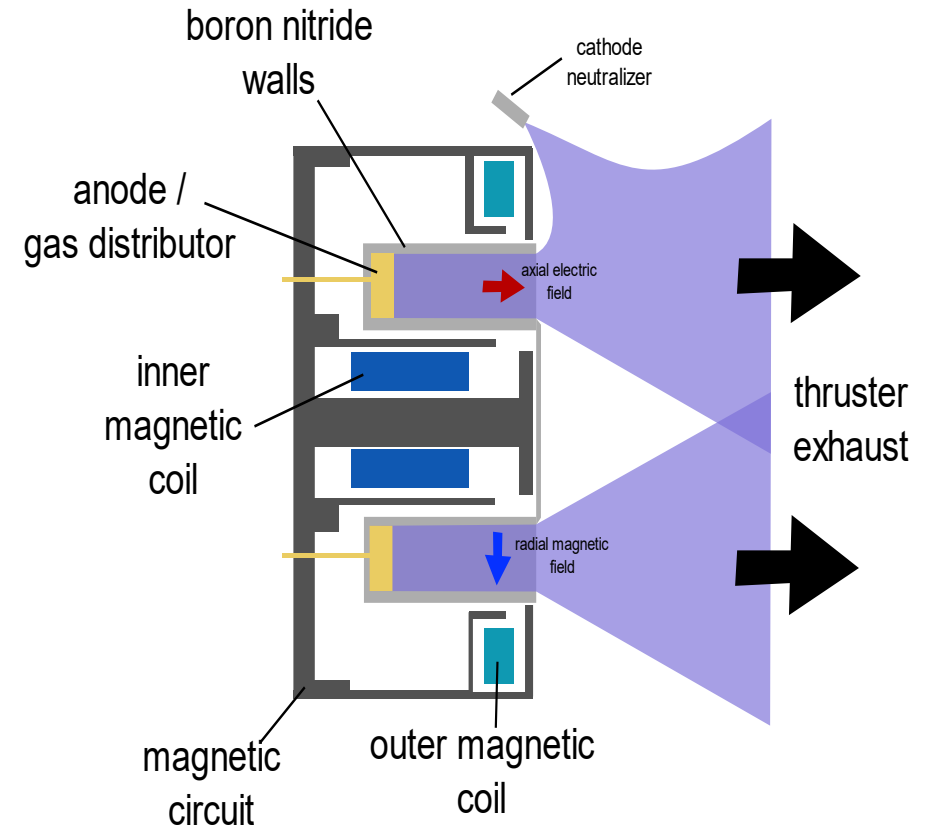


A differenza dei propulsori a griglia elettrostatica, i propulsori a effetto Hall, accelerano gli ioni tramite un potenziale elettrico che viene mantenuto tramite l'utilizzo di un anodo cilindrico e un catodo 'fittizio' formato da plasma caricato negativamente.

1. **Iniezione** del propellente attraverso l'anodo, progettato come un distributore di gas. Gli atomi neutri di gas vengono ionizzati ottenendo una carica positiva pressoché unitaria.

2. **Accelerazione** degli ioni ad opera del campo elettrico, raggiungendo rapidamente velocità che sfiorano i **15000 m/s**.

3. Il campo magnetico radiale **deflette gli elettroni** ma non gli ioni → maggior parte degli elettroni orbita nella regione con elevato campo magnetico radiale.
→ **CORRENTE DI HALL**



L'efficienza energetica di questo propulsore è limitata perché circa il 30% della corrente di scarica è una corrente di elettroni che non produce spinta e solo il restante 70% sono ioni.

Se la spinta viene paragonata a quella dei razzi chimici risulta particolarmente ridotta, tuttavia essi operano ai maggiori impulsi specifici rispetto a tutti gli altri propulsori ionici.

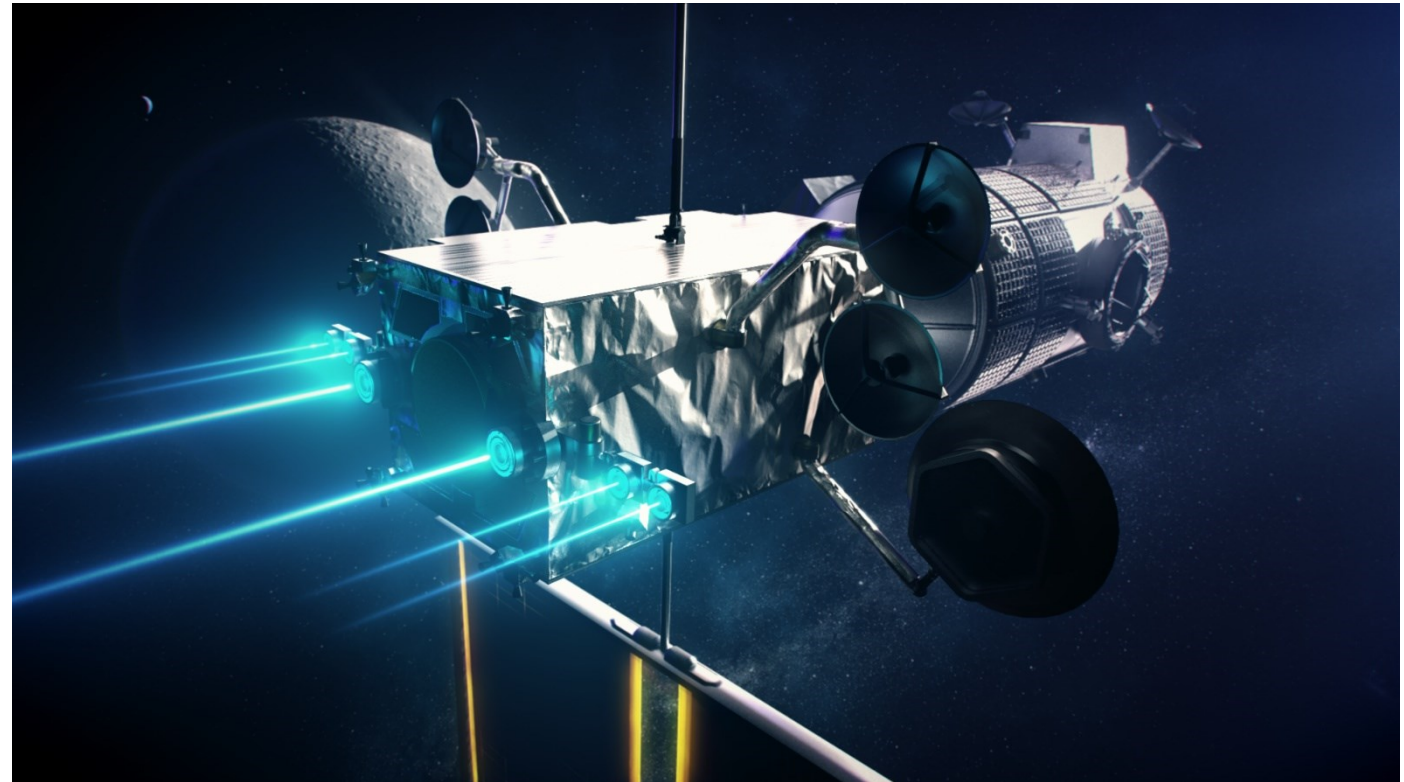
- Principali vantaggi →
- **Assenza di limitazioni** nella corrente di saturazione
 - Possibilità di utilizzare una **varietà più ampia di propellenti**

La propulsione ionica ad emissione di campo è un concetto di propulsione elettrostatica avanzata che sfrutta il **metallo liquido**, solitamente cesio o indio, come propellente. La scelta di Cesio e Indio è dettata dal loro peso atomico elevato, dai bassi potenziali di ionizzazione e dalle basse temperature di fusione.

Questo propulsore ha un funzionamento piuttosto elementare: una piccola riserva di propellente contenente metallo liquido che viene fatto scorrere attraverso un piccolissima feritoia e un anello acceleratore.

All'interno della feritoia nel emettitore il metallo liquido viene ionizzato per mezzo di un campo elettrico tra emettitore e anello acceleratore. Gli ioni così ottenuti vengono poi accelerati ad opera dello stesso campo elettrico per produrre la **spinta** ed essere infine rineutralizzati dopo l'espulsione.

La spinta che si ottiene è molto piccola, di conseguenza i propulsori ionici FEEP vengono utilizzati principalmente per il **controllo di assetto** nei veicoli spaziali.



Propulsore per induzione ad impulso (PIT) → propulsore ionico al plasma che sfrutta campi magnetici ed elettrici perpendicolari per accelerare del propellente senza l'utilizzo di elettrodi.

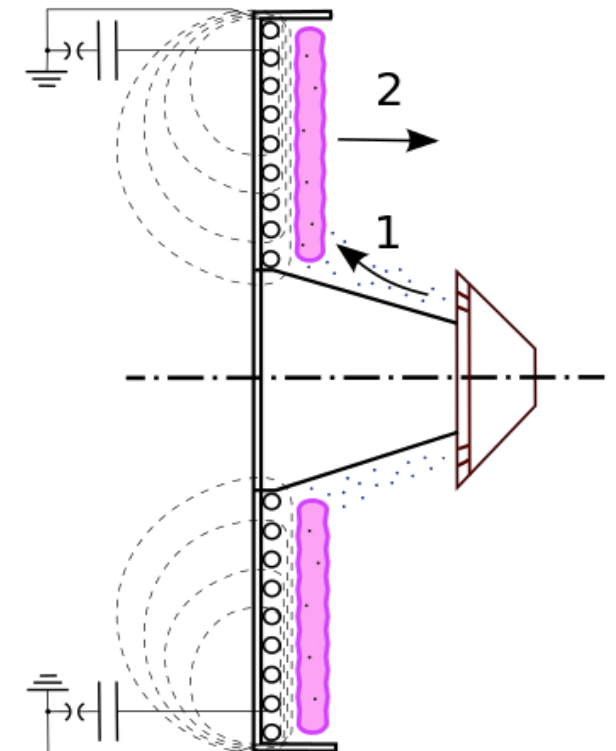
- Utilizzano la forza di **Lorentz**
- **Impulso specifico** e efficienza **costanti** con un ampio range di livelli di potenza in entrata
- Funzionano con **svariati gas** diversi tra cui acqua, idrazina e ammoniaca

1. Un ugello **rilascia del gas** che si diffonde attraverso una spira di induzione piana.

2. Un gruppo di condensatori rilascia un **impulso di corrente** elettrica di circa 10 secondi nella spira permettendo la generazione di un campo magnetico radiale.

3. Gli ioni, dopo essere stati accelerati vengono **espulsi** nello spazio a causa della forza di Lorentz.

NON incorre nel problema **dell'erosione**.



Utilizza un propellente allo stato gassoso che viene ionizzato ed immesso in una camera di accelerazione in cui si crea un campo elettromagnetico.

Le particelle vengono spinte verso il condotto di uscita tramite la forza di Lorentz.

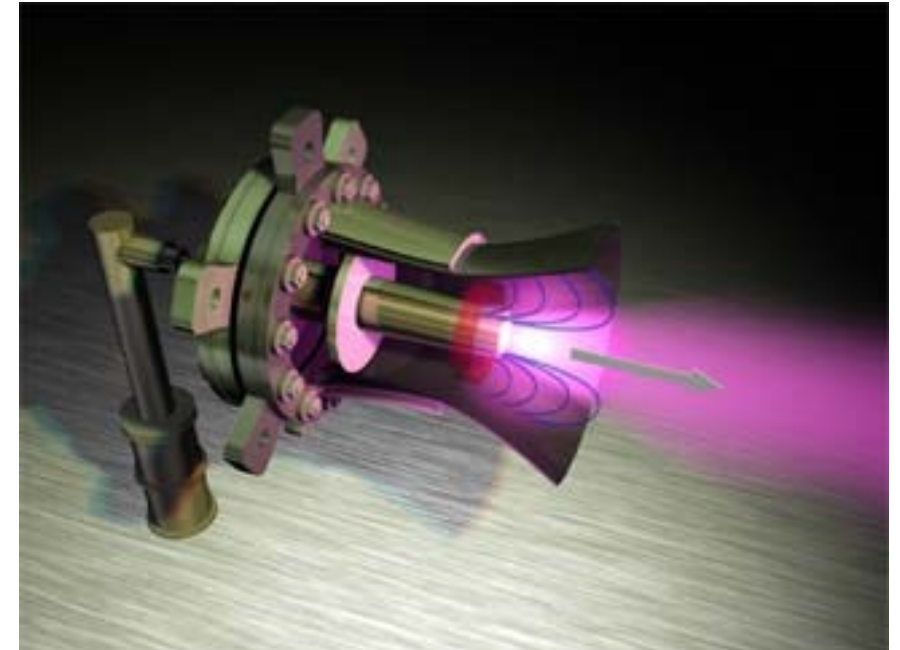
- Propulsori a **campo magnetico applicato** → magneti attorno alla camera di accelerazione
- Propulsori a **campo magnetico indotto** → Biot Savart

Una potenziale applicazione è la propulsione principale per **cargo pesanti** e veicoli spaziali pilotati.

Possono produrre **impulsi specifici molto alti** con una velocità residua che supera i 110.000 m/s, i più alti tra tutte le applicazioni di propulsione elettrica.

Interesse commerciale basso a causa di alcuni problemi

Degradazione dei catodi dovuta all'evaporazione



1. Il propellente viene **iniettato** dall'apertura superiore del corpo del propulsore.
 2. Il propellente gassoso viene **ionizzato** con i:
 - **bombardamento** del propellente con elettroni
 - una **differenza di potenziale** tra due elettrodi
 - un campo elettrico alternato
 - **onde** elettromagnetiche di diverse frequenze
 3. Il processo di ionizzazione può utilizzare uno dei numerosi metodi di **risonanza** esistenti.
 4. Il plasma freddo e denso viene **indirizzato** verso lo stadio di accelerazione.
 5. Nello stadio di accelerazione il plasma è accelerato tramite forza ponderomotrice magnetizzata.
- Vantaggi** → - produrre grandi densità di spinta
- non serve un neutralizzatore
 - la completa assenza di griglia evita il pericolo dell'erosione e problemi di contaminazione

Impiega onde radio per creare **plasma** e un **ugello magnetico**.

Quest'ugello convoglia e accelera il plasma.

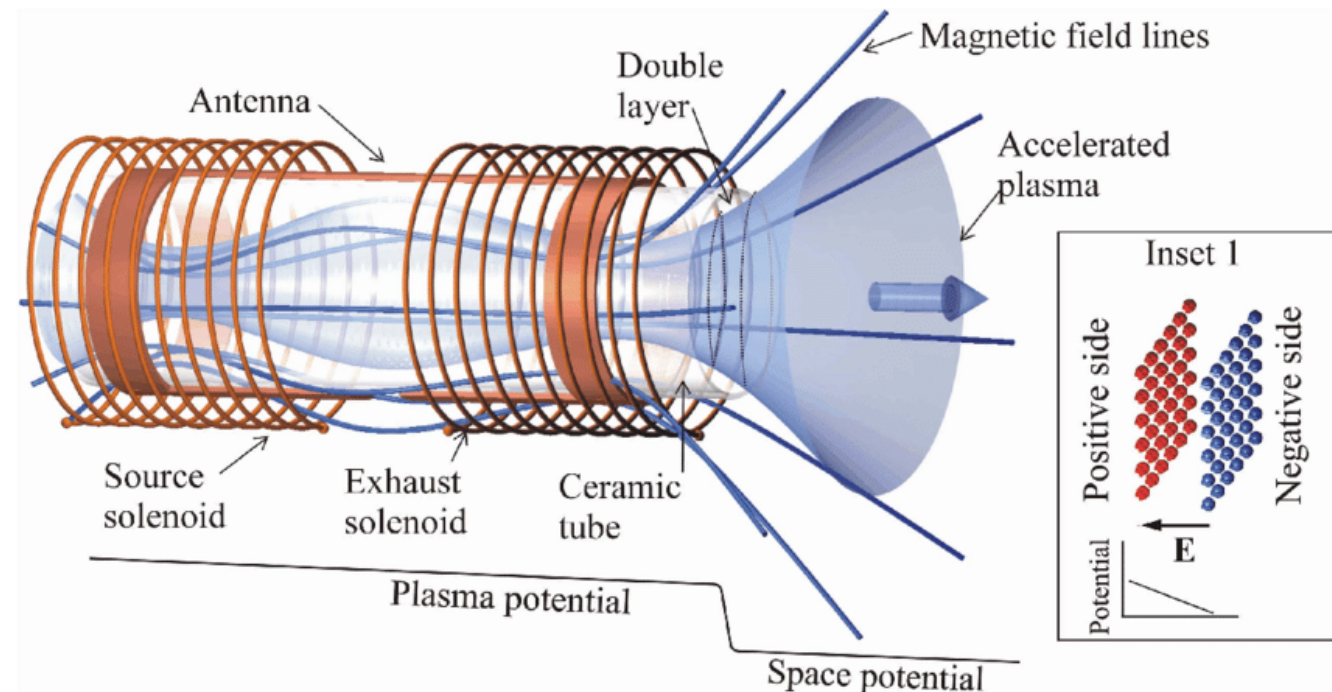
Espellono poi gas ionizzato ad alte velocità per fornire una spinta allo spacecraft.

Un'antenna emette **onde elettromagnetiche** che formano plasma.

Durante il funzionamento c'è un forte legame tra il plasma ad alta densità dentro alla regione della sorgente e il plasma con bassa densità esausto.

Il propulsore Helicon a doppio strato ha due principali **vantaggi**:

1. Crea un campo magnetico in grado di accelerare gli ioni senza necessitare dell'inserimento di componenti poco affidabili come griglie ad alta tensione.
2. Non è necessario un **neutralizzatore** dato che il numero di elettroni e di ioni è uguale.



Propulsore elettrotermico al plasma sotto sviluppo per possibili applicazioni aerospaziali.

Propellente inerte → plasma → accelerato da un campo magnetico → spinta

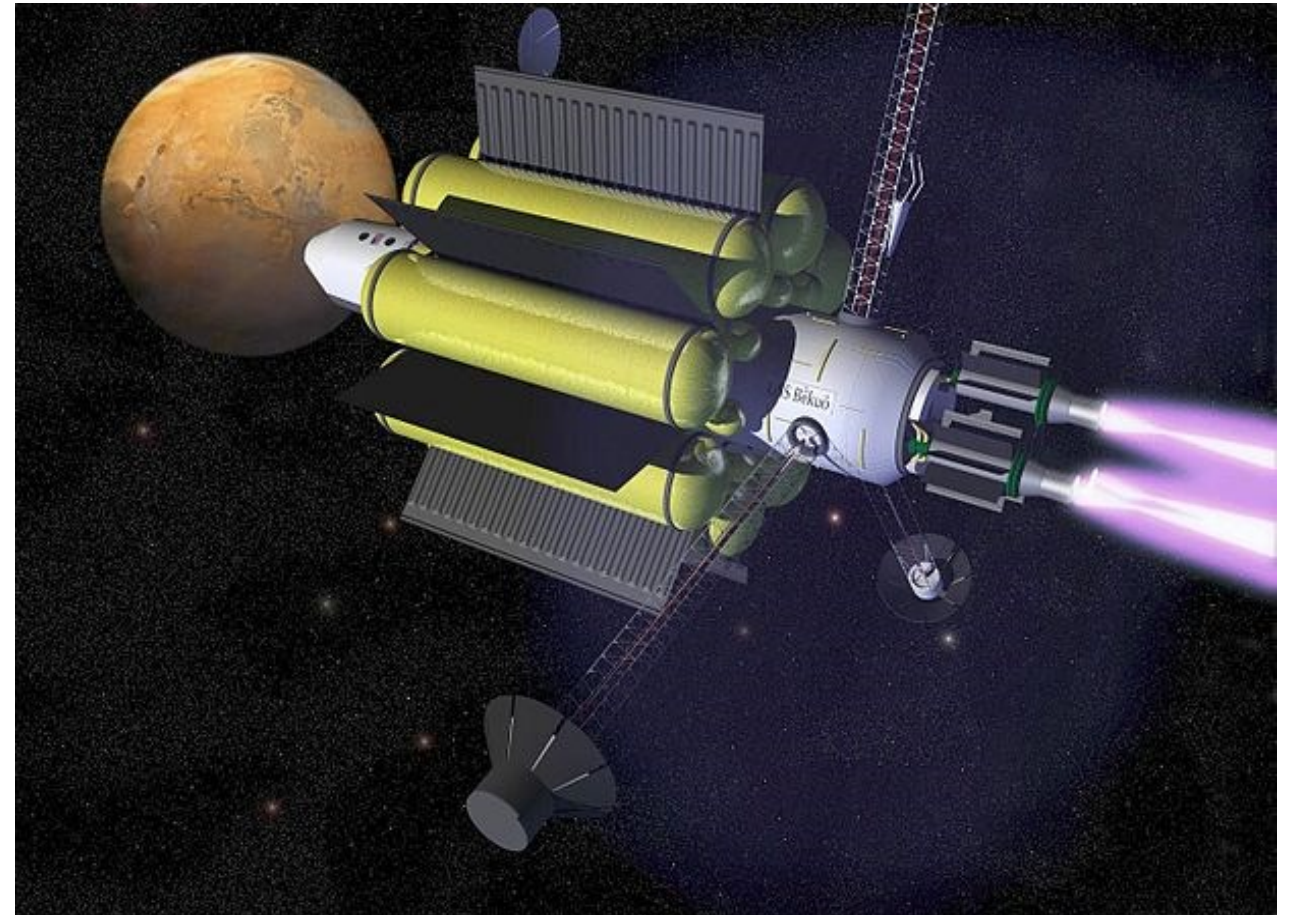
Il propellente viene iniettato all'interno di un cilindro cavo ricoperto di elettromagneti. Al variare della quantità di energia e plasma, VASMIR è in grado di generare 'alto impulso con bassa spinta' e viceversa.

La seconda fase del motore è un forte elettromagnete che canalizza il plasma ionizzato.

Un secondo accoppiatore emette onde elettromagnetiche.

Il percorso degli ioni e degli elettroni attraverso il motore può essere approssimato a delle linee parallele alle pareti del motore.

Il VASMIR non utilizza elettrodi eliminando quindi l'erosione.



Le applicazioni principali possono essere collocate in ambito **aerospaziale**.

La qualità principale di queste tecnologie è sicuramente la loro **lunga durata** per tutte le applicazioni in cui non servono spinte eccessivamente grandi.

- **Trasferimenti** d'orbita
- **Aggiustamenti** nell'allineamento
- **Compensazione** della resistenza aerodinamica
- Fini aggiustamenti nelle missioni più **scientifiche**

Al momento le **missioni** che hanno utilizzato questa tecnologia sono diverse e tra le tante ricordiamo:

- SERT
- DEEP SPACE 1
- ARTEMIS
- LISA Pathfinder
- BepiColombo