

# LA PROPULSIONE ELETTRICA

Novembre 2009

# Cenni sulla Propulsione

---

- ▶ Il moto di un razzo in assenza di gravità è descritto dalla equazione

$$m\dot{v} = \dot{m}v_e,$$

dove  $m$  è la massa del veicolo a un dato momento e  $v_e$  è la velocità del getto di propellente.

- ▶ Nel caso che la velocità di scarico sia uniforme si ottiene:

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_o}{m_f},$$

o anche

(Tsiolkovsky)

$$\frac{m_f}{m_o} = e^{-\Delta v/v_e}.$$

- ▶ Ogni missione spaziale (e ogni manovra) è caratterizzata da un  $\Delta v$  equivalente, che ne rappresenta il costo energetico, e dalla  $m_f$  ( $\approx$ payload).
- 



# La propulsione elettrica

---

- ▶ La quantità di propellente necessaria alla missione decresce aumentando la velocità di scarico ma per i propulsori chimici questa velocità è limitata dall'energia di reazione disponibile e dalla capacità di trasporto di calore delle pareti ( $v_e < 4500$  m/s).
- ▶ Per ottenere velocità di scarico elevate si può ricorrere a campi elettrici e magnetici:
  - ▶ Il concetto di accelerazione elettrostatica viene descritto per la prima volta da Goddard (1906) e Tsiolkovsky (1911).
  - ▶ Acceso interesse negli anni della corsa allo spazio ('50 – '60)
  - ▶ Sviluppo e sperimentazione dei motori a ioni (primo esemplare del motore Kaufman costruito nel 1959, primo lancio di prova nel 1963 e campagna di sperimentazione fino al 1970)
  - ▶ Nell'Unione Sovietica sviluppo e sperimentazione dei motori a effetto Hall (primi test di volo nel 1962, in produzione dal 1969)



# La propulsione elettrica

---

- ▶ A differenza dei propulsori chimici, la potenza richiesta da questi motori non viene fornita dal propellente ma da una sorgente esterna al processo accelerativo (pannelli solari, batterie ...).
- ▶ Di conseguenza, la velocità di scarico non è limitata a priori ma la spinta ottenibile dipende dalla potenza disponibile a bordo .
- ▶ La potenza richiesta per una spinta assegnata ( $T$ ) cresce linearmente con  $v_e$ :

$$P = \frac{\dot{m}v_e^2}{2\eta} = \frac{Tv_e}{2\eta}$$

dove  $\eta$  rappresenta l'efficienza del propulsore.

- ▶ La massa del sistema di generazione di potenza ( $m_p$ ) aumenta in proporzione alla potenza richiesta:

$$m_p = \alpha P = \frac{\alpha T v_e}{2\eta}$$

- ▶ Ogni missione ha perciò un campo di  $v_e$  ottimale
- 



# Categorie dei propulsori elettrici

---

- ▶ **Propulsione Elettrotermica** - Il propellente è riscaldato elettricamente ed espanso attraverso un ugello fino alla velocità

$$v_e < \sqrt{2C_p T/M} \quad T = \text{temperatura massima dell'ugello}, \\ C_p = \text{calore specifico}, M = \text{peso atomico}$$

- ▶ **Propulsione Elettrostatica** - Si sfrutta un campo elettrico esterno  $E$  per accelerare le particelle cariche create ionizzando il propellente :

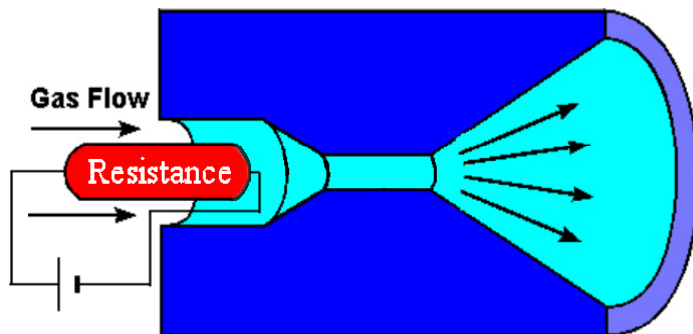
$$v_e \approx \sqrt{2qV/M} \quad V = \text{differenza di potenziale elettrico}, \\ q = \text{carica degli ioni}, M = \text{peso atomico}$$

- ▶ **Propulsione Elettromagnetica** - Basata sull'interazione fra la corrente che scorre nel fluido propellente (plasma) ed i campi elettromagnetici presenti nella stessa regione. Il plasma è considerato quasi-neutro.

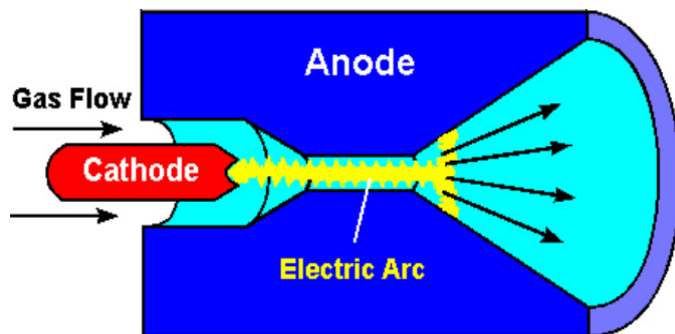


# Propulsione elettrotermica

*Resistogetto*



*Arcogetto*

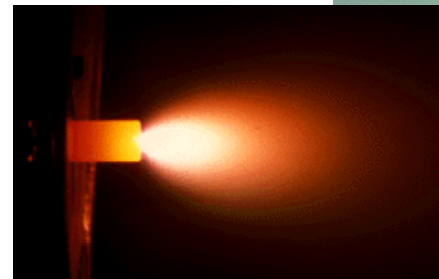
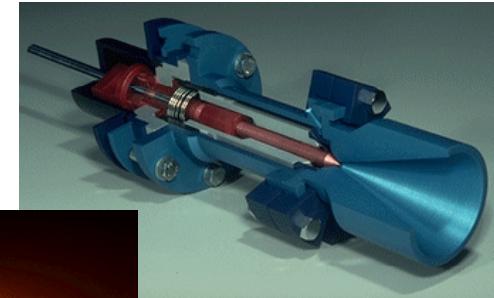
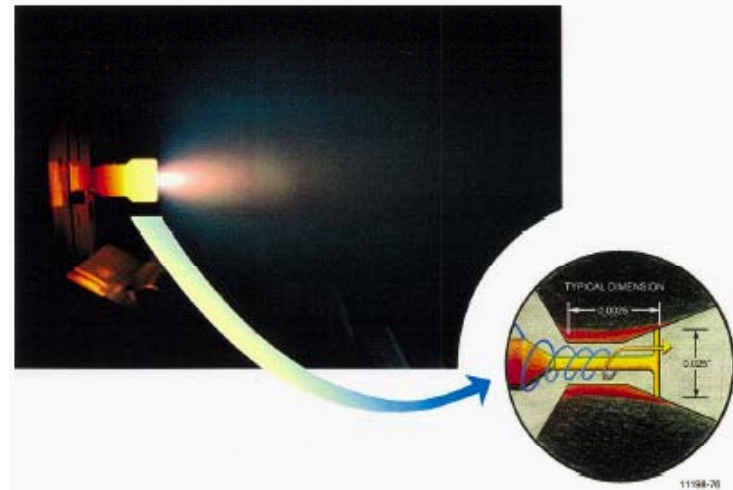


- ▶ Il gas viene accelerato attraverso un processo di carattere termodinamico
- ▶ La scelta del propellente non è vincolata da processi di combustione.
- ▶ Sono preferibili gas a basso peso molecolare e alto calore specifico (idrogeno, ammoniaca, idrazina)
- ▶ Resistogetto: il riscaldamento avviene per semplice contatto con un elemento resistivo
- ▶ Arcogetto: Il riscaldamento avviene a seguito dello scoccare di un arco elettrico
- ▶ Basse velocità di scarico ( $< 10000$  m/s) e rendimenti paragonabili a quelli dei razzi chimici

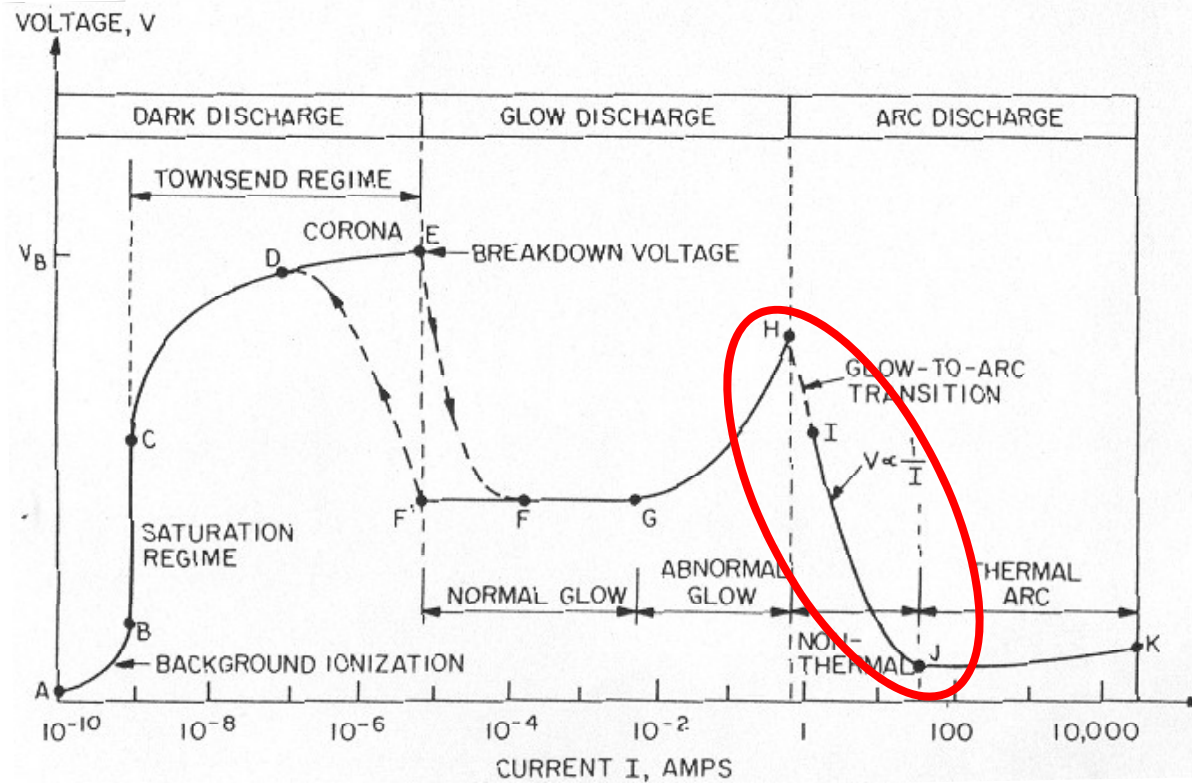


# Arcogetto

- ▶ Aumentare la temperatura del propellente mantenendo la temperatura di parete sostanzialmente più bassa.
- ▶ Forti gradienti radiali e fenomeni di sheet su anodo e catodo mantengono la temperatura su valori tollerabili.
- ▶ Il riscaldamento del propellente avviene attraverso due processi fondamentali:
  - ▶ grazie al passaggio attraverso la scarica della parte centrale del flusso;
  - ▶ grazie al calore ceduto al flusso esterno dalle pareti (scaldate dalla scarica per irraggiamento e nella zona di attacco sull'anodo);



# Arcogetto



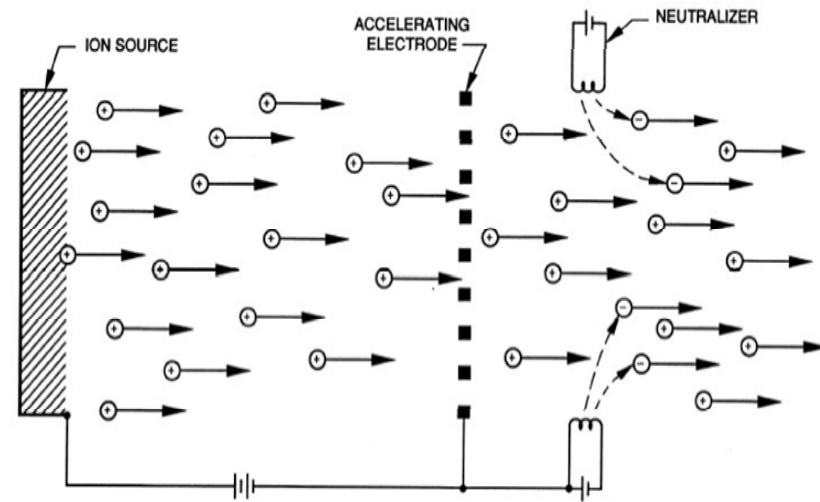
- ▶ Dato che la funzione  $V-I$  per la scarica ha pendenza negativa, è necessario un sistema di controllo della potenza per evitare instabilità



# Propulsione elettrostatica

## Descrizione del processo accelerativo elettrostatico

- ▶ Gli ioni creati da una apposita sorgente sono accelerati per mezzo di una differenza di potenziale imposta fra la sorgente e la griglia permeabile posta all'uscita del motore.
  - ▶ All'uscita si provvede a neutralizzare il flusso.
  - ▶ Dal bilancio di energia degli ioni si ricava:
  - ▶ Dalla legge di Child si ottiene:
- e la massima densità di spinta ottenibile risulta:



$$v_e = \left( \frac{2qV}{M} \right)^{1/2}$$

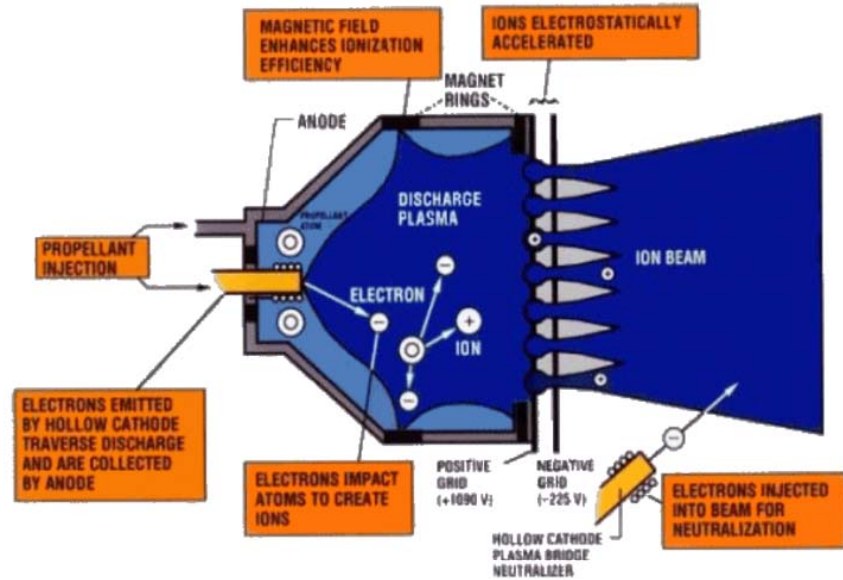
$$j = \frac{4\epsilon}{9} \left( \frac{2q}{M} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{d^2},$$

$$\frac{T}{A} = \frac{\dot{m}v_e}{A} = \frac{jMv_e}{q} = \frac{8\epsilon}{9} \left( \frac{V}{d} \right)^2$$

# Propulsione elettrostatica

## Descrizione delle sorgente

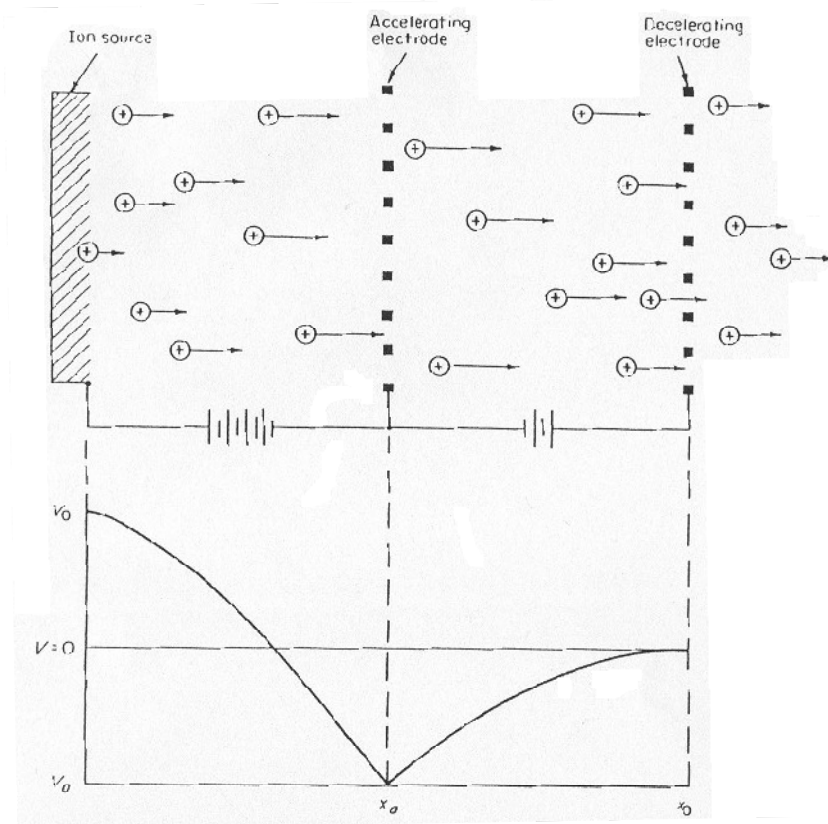
- ▶ Il propellente viene iniettato nella camera e ionizzato per bombardamento elettronico:
  - ▶ Il catodo centrale emette elettroni;
  - ▶ L'anodo è costituito dalle pareti della camera di ionizzazione;
  - ▶ Per aumentare l'efficacia della ionizzazione il moto verso l'anodo degli elettroni è rallentato dal campo magnetico.
- ▶ Sorgenti alternative:
  - ▶ Ionizzazione tramite scarica RF (maggiore efficienza e durata ma necessità di un modulo RF nel sistema di gestione della potenza) – WE
  - ▶ Ionizzazione tramite microne (ECR) – JAPAN
  - ▶ Ionizzazione per contatto: vapori di cesio attraversano una matrice porosa di tungsteno



# Propulsione elettrostatica

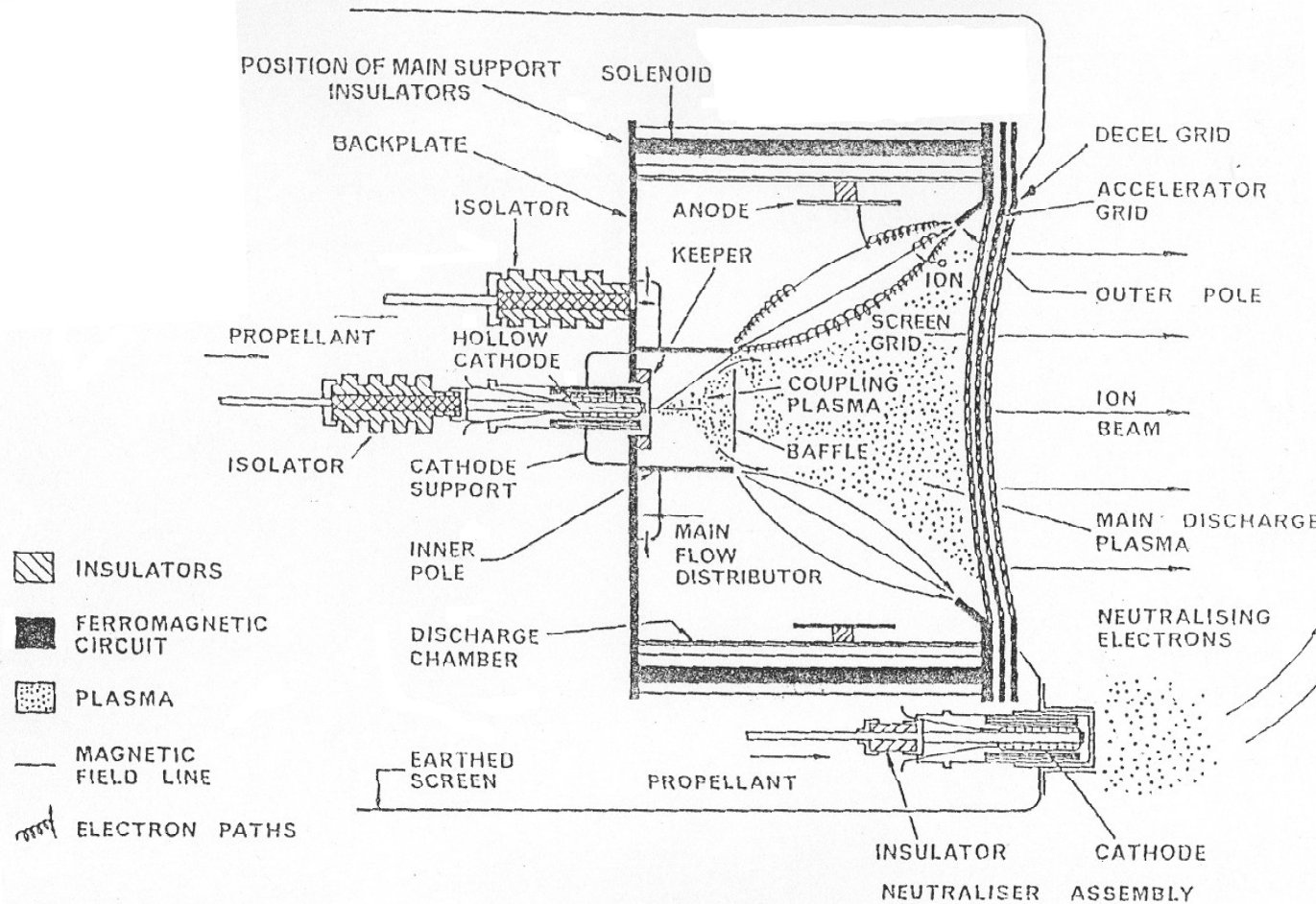
## Descrizione delle griglie

- ▶ La configurazione tipica prevede una doppia griglia
- ▶ La prima griglia (acceleratrice) è mantenuta a un potenziale più alto di quello richiesto in uscita:
  - ▶ Questo permette di estrarre una maggiore portata di ioni.
- ▶ La seconda griglia (deceleratrice) riduce il potenziale in uscita al valore desiderato :
  - ▶ Questo ha il vantaggio di ridurre il flusso di rientro degli elettroni
- ▶ Le griglie rappresentano la prima causa di usura di questo tipo di motori. Per questo una particolare attenzione è posta nel collimare i fasci di ioni (e nel ridurre il numero di ioni doppi e atomi neutri che risultano fuori fuoco).



# Propulsione elettrostatica

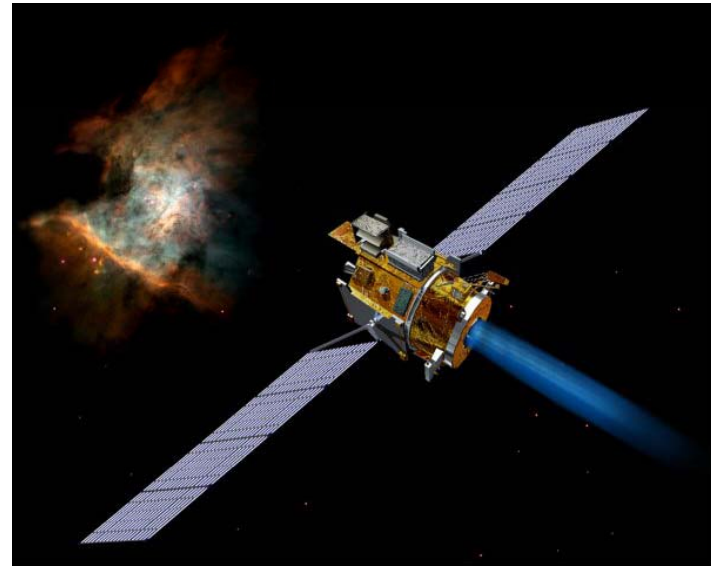
## Schema del motore Kaufman



# Propulsione elettrostatica

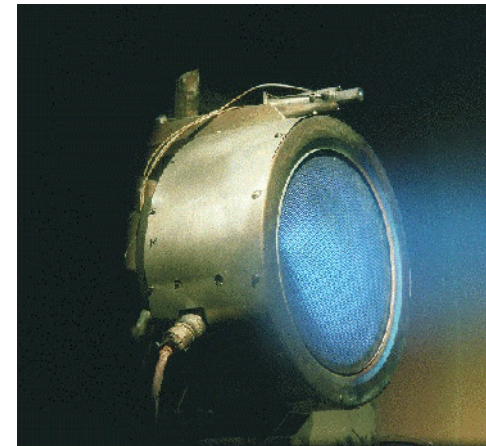
## Caratteristiche tipiche

- ▶ Velocità efficace di scarico  $\approx 30,000$  m/s
- ▶ Lunga vita operativa ( $>20.000$  hr)
- ▶ Bassa divergenza del fascio ( $<20$  deg)
- ▶ Alta efficienza (65%)
  
- ▶ Bassa densità di spinta
- ▶ Complesso sistema di gestione della potenza (  $\alpha \approx 10$  kg/kW)
  
- ▶ Si utilizzano elementi ad alto peso atomico e bassa energia di ionizzazione (mercurio, cesio, **xenon** ...)



Deep Space 1

NASA/JPL/CalTech.



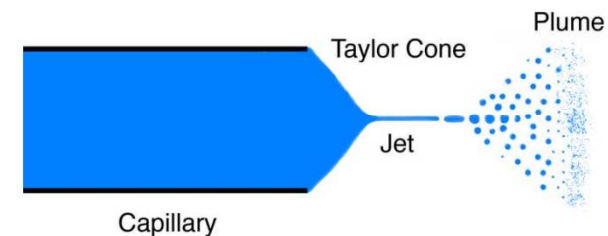
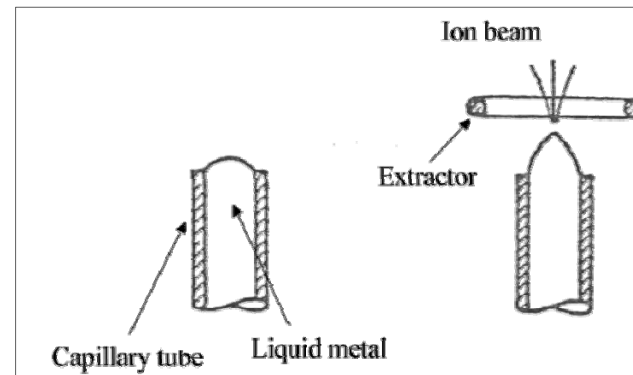
# Propulsione elettrostatica

## Il Motore ad Emissione di Campo (FEEP)

- ▶ Il liquido propellente (cesio) scorre per capillarità fra le lastre di un emettitore.
- ▶ Il processo propulsivo si basa sulla interazione fra tensione superficiale e un campo elettrico  $E$ . All'equilibrio sulla superficie libera vale l'equazione

$$2\gamma \frac{1}{r} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

dove  $\gamma$  è la tensione superficiale e  $r$  il raggio di curvatura.

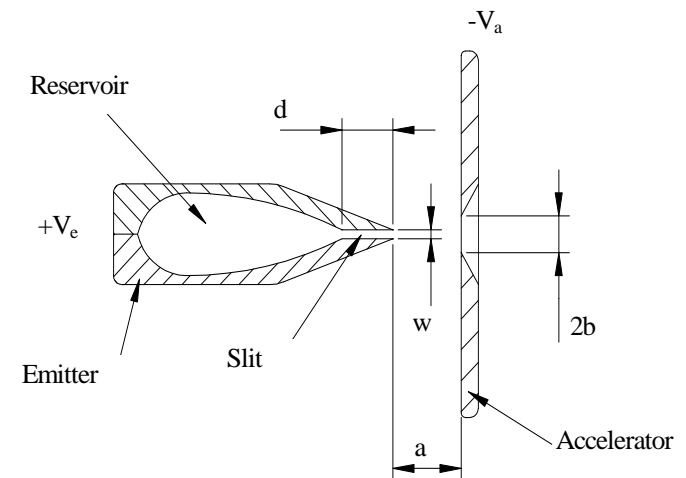
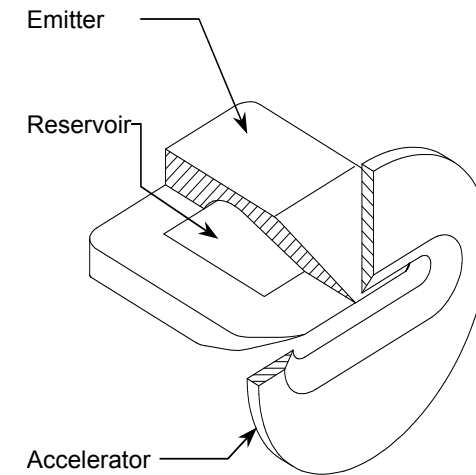


- Considerando la superficie del liquido equipotenziale e aumentando l'intensità del campo elettrico la superficie tende a formare un cono di angolo fissato  $\approx 98.6$  deg (cono di Taylor). Sperato un valore critico all'estremità del cono si forma un getto di particelle cariche.

# Propulsione elettrostatica

## Il Motore ad Emissione di Campo (FEEP)

- ▶ Il motore a emissione di campo è formato da una apertura di lunghezza  $L$  e spessore dell'ordine di 1-2 formata fra le due lamine dell'emettitore
- ▶ A causa di instabilità locali lungo tutta la superficie del liquido si forma una serie di coni di Taylor
- ▶ Gli ioni vengono accelerati dall'elettrodo aperto posto di fronte
- ▶ La spinta prodotta è direttamente proporzionale alla lunghezza dell'apertura
- ▶ Successivamente il flusso viene neutralizzato.



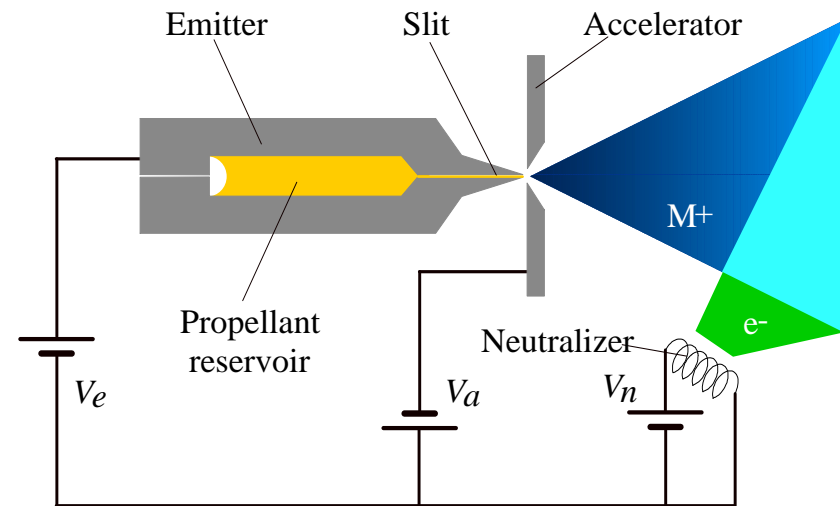
# Propulsione elettrostatica

## Il Motore ad Emissione di Campo (FEEP)

- ▶ Tipici voltaggi operativi sono  $V_e = +5$  kV,  $V_a = -5$  kV. La velocità di scarico risulta:

ed è di solito  $> 60.000$  m/s

- ▶ Elevata efficienza ( $\approx 98\%$ ) dovuta alla assenza di effetti dissipativi significativi.
- ▶ Spinte molto ridotte.





# Propulsione elettromagnetica

---

- ▶ Basati sull'interazione fra la corrente  $j$  in un fluido conduttivo (plasma) e il campo magnetico  $B$ , esterno o autoindotto, che permea la stessa regione

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

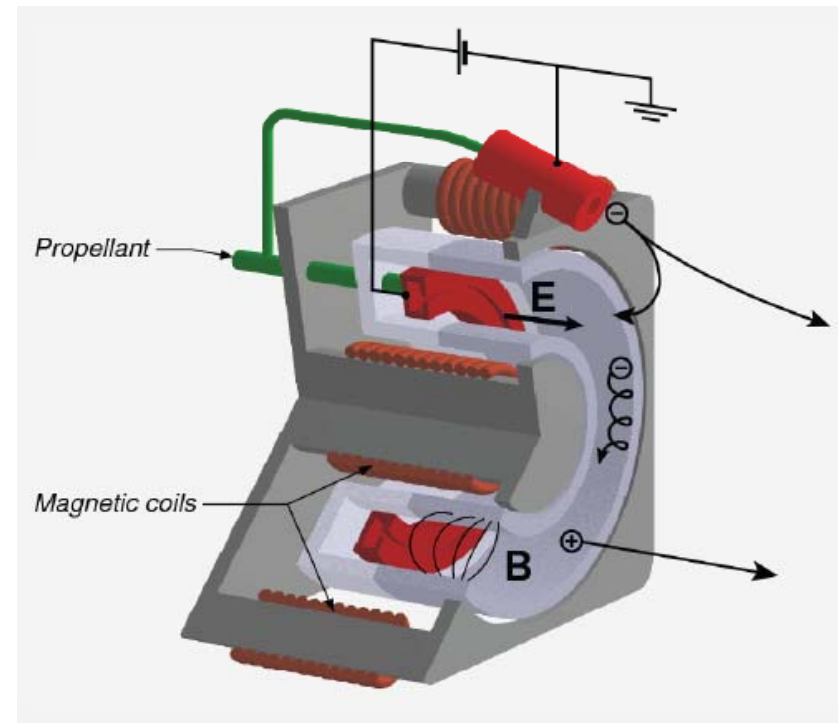
- ▶ Vale l'ipotesi di quasi-neutralità (escluse regioni di dimensioni ridotte rispetto a quella caratteristica del motore).
- ▶ Densità di spinta molto maggiori dei propulsori elettrostatici.
- ▶ Grande varietà di configurazioni possibili:
  - ▶ I campi applicati e le correnti possono essere stazionari, pulsati o alternati su un vasto spettro di frequenze.
  - ▶ Sono possibili differenti geometrie degli elettrodi e della camera di accelerazione.
  - ▶ Diversi tipi di propellente e forme di ionizzazione.
- ▶ Le tipologie più sviluppate sono: Motori a effetto Hall, MPD, PPT.



# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore a effetto Hall (HET)

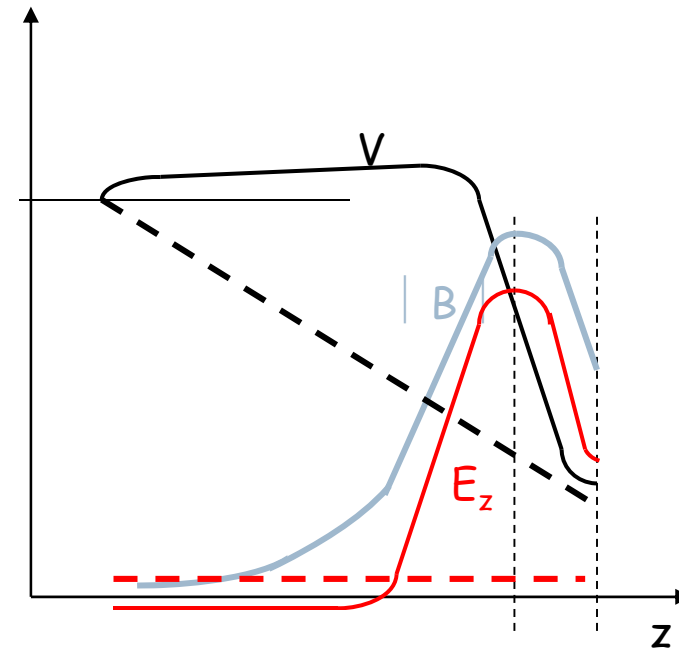
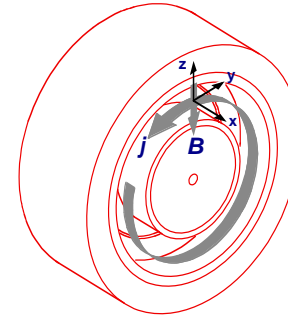
- ▶ Affinchè un motore a effetto Hall funzioni correttamente bisogna che si abbia una densità del plasma sufficientemente bassa e un forte campo magnetico.
- ▶ In queste condizioni la corrente che ne deriva è prevalentemente in direzione  $E \times B$  (effetto Hall)
- ▶ Le dimensioni tipiche della zona accelerativa devono soddisfare
$$\left( r_e = \frac{m_e |\mathbf{u}_e \times \mathbf{B}|}{eB^2} \right) < L \ll \left( r_i = \frac{m_i |\mathbf{u}_i \times \mathbf{B}|}{eB^2} \right)$$
- ▶ Analogamente a quanto avviene nella propulsione elettrostatica, la velocità di scarico degli ioni risulta  $v_e = (2eV_A/m_i)^{1/2}$



# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore a effetto Hall (HET)

- ▶ Il propellente viene iniettato nella camera e ionizzato dalla corrente di scarica
- ▶ La presenza di un forte campo magnetico radiale all'uscita del motore riduce la mobilità assiale degli elettroni
- ▶ La caduta di potenziale imposta fra anodo e catodo si concentra all'uscita del motore e determina un forte campo elettrico assiale.
- ▶ Gli ioni presenti nel plasma sono quindi accelerati.
- ▶ All'uscita si provvede a neutralizzare il flusso



# Propulsione elettromagnetica

---

## **Il Motore a effetto Hall (HET)**

- ▶ Nella realtà esistono molti effetti che alterano la situazione e giocano un ruolo cruciale nel determinare l'efficacia del processo accelerativo.
- ▶ I dettagli sulla **topologia del campo magnetico** hanno ricadute molto complesse sul processo.
- ▶ E' stato mostrato sperimentalmente che **la diffusività elettronica** si comporta in modo abbastanza diverso da quanto suggeriscono i modelli classici (diffusività anomala).
- ▶ **L'interazione fra il plasma e le pareti** e la conseguente emissione elettronica secondaria condizionano sia la diffusività che le perdite di energia alle pareti. L'ottimizzazione del motore dipende anche dalla geometria del canale.
- ▶ **Il processo di ionizzazione** deve completarsi efficacemente nella parte iniziale del canale accelerativo per assicurare un funzionamento corretto del motore.



# Propulsione elettromagnetica

---

## Il Motore a effetto Hall (HET)

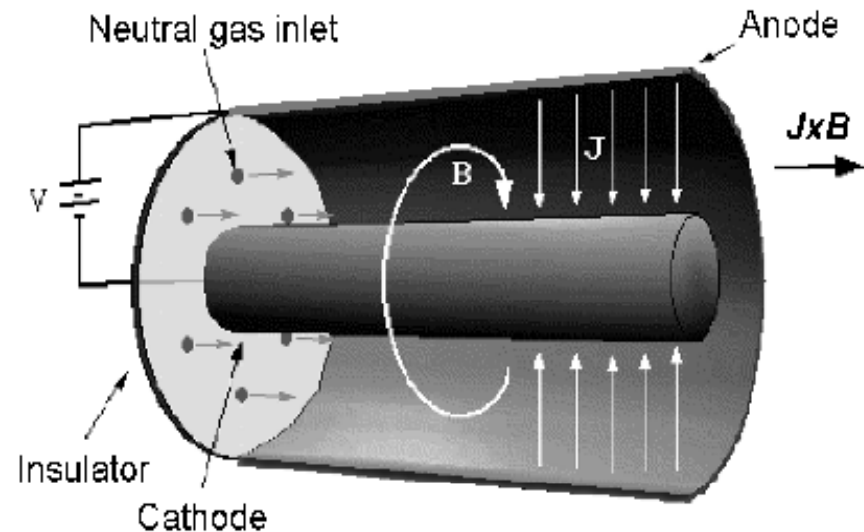
- ▶ Ottimizzati fra gli anni '60 e '90 nell'ex URSS
- ▶ Lunga esperienza di volo
- ▶ Buona efficienza (>50%) e scalabilità.
- ▶ Velocità efficace di scarico  $\approx 16,000$  m/s
  
- ▶ Divergenza del getto relativamente ampia, fra 30 e 40 gradi



# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

- ▶ La differenza di potenziale fra anodo e catodo genera una corrente di scarica radiale che ionizza il propellente
- ▶ Il plasma generato viene accelerato verso l'uscita dall'interazione fra la corrente ed il campo magnetico autoindotto
- ▶ Spinte anche significative vista l'elevata densità del plasma ( $\approx 10^{21} \text{ m}^{-3}$ )
- ▶ Difficoltà nella sperimentazione in regime stazionario visti gli elevati valori di potenza richiesti, possibilità di operare in regime quasi-stazionario o pulsato.
- ▶ Rendimenti elevati ( $>40\%$ ) per livelli di potenza maggiori ( $>100 \text{ kW}$ ).



# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

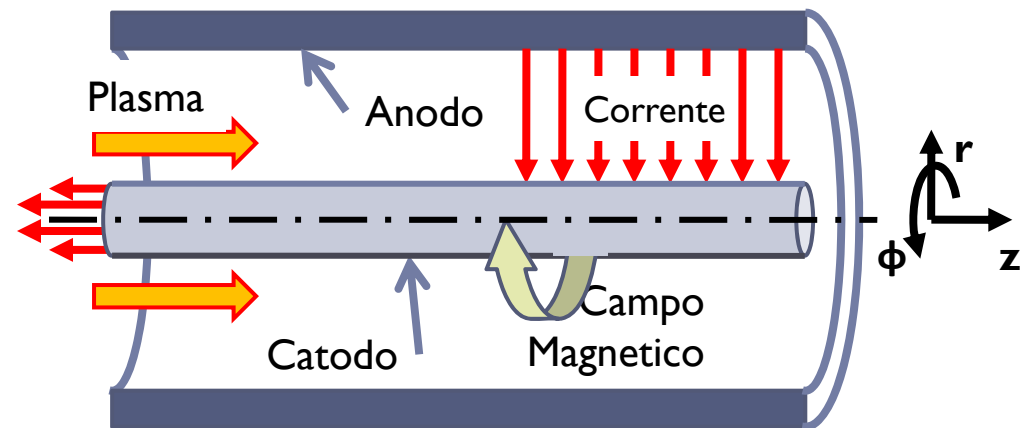
- ▶ Integrando la forza di Lorentz su tutto il volume del canale si ottiene:

$$T = \frac{\mu J^2}{4\pi} \left( \ln \frac{r_a}{r_c} + A \right),$$

dove il parametro  $A < 1$  dipende dalla configurazione degli elettrodi e della scarica.

- ▶ Dal bilancio di energia si ricava  $\dot{m} \Delta \left( \frac{v_z^2}{2} \right) = I_{tot} \Delta V.$

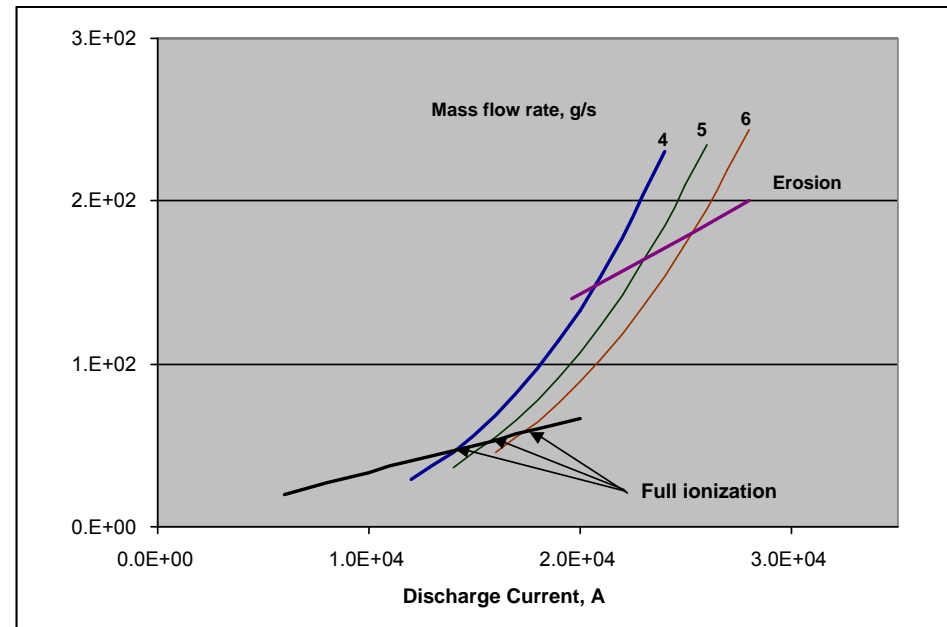
Dato che  $T \approx m \Delta v$ , si ottiene una caratteristica tensione-corrente di tipo cubico.



# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

- ▶ La caratteristica elettrica di un motore reale segue solo in una regione ristretta l'andamento cubico predetto dal modello ideale
- ▶ Per regimi di corrente troppo bassi per ionizzare completamente il gas la dipendenza è lineare
- ▶ In seguito alla piena ionizzazione l'andamento diventa cubico
- ▶ Quasi subito, però, la scarica entra in un regime di fluttuazioni del potenziale e aumenta l'erosione degli elettrodi (regime di onset)
- ▶ In seguito all' "onset" la caratteristica elettrica tende a tornare a una dipendenza lineare da  $J$





# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

- ▶ La velocità critica di ionizzazione (Alfven) rappresenta il limite di velocità raggiungibile nel caso in cui il propellente sia solo parzialmente ionizzato.
- ▶ Questo implica un andamento lineare fra il potenziale elettrico e la corrente.
- ▶ Un parametro importante per determinare il regime del motore MPD è il rapporto fra la velocità di scarico e la velocità critica:

$$\xi \equiv \left[ \frac{J^2 \mu \left( \ln \frac{r_a}{r_c} + A \right)}{\dot{m} 4\pi (2\phi_i / M)^{1/2}} \right]^{1/2}$$

*MPD regime:*  $\xi > 1$

*Stable, low – erosion operation:*  $\xi < 2$

- ▶ E' chiaro che per motori di questo tipo c'è l'interesse ad andare su regimi in cui , e quindi capire a fondo le cause dell'onset.

$$v_{crit} = \left( 2\Phi_i / M \right)^{1/2}$$

*v<sub>crit</sub> = Alfven critical speed*

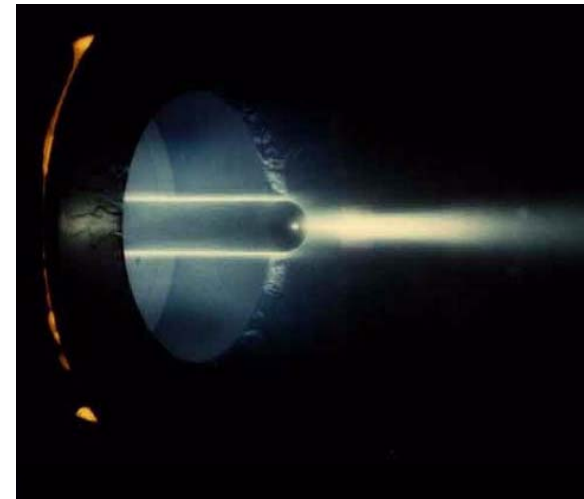
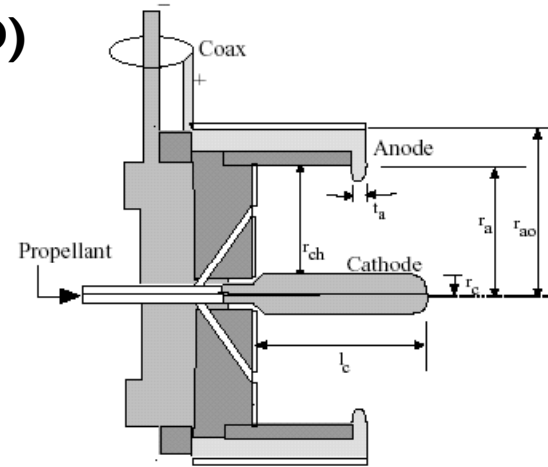
*Φ<sub>i</sub> = propellant ionization potential*

*M = propellant atomic mass*

# Propulsione elettromagnetica

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

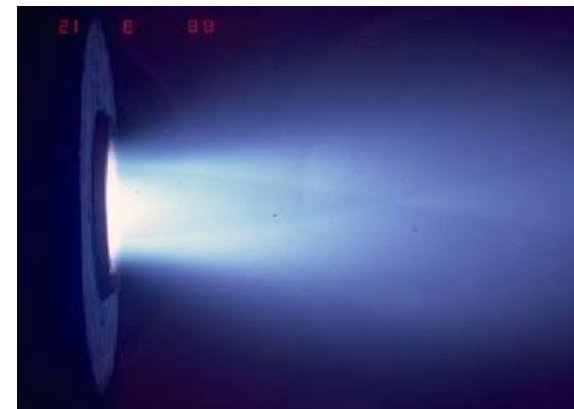
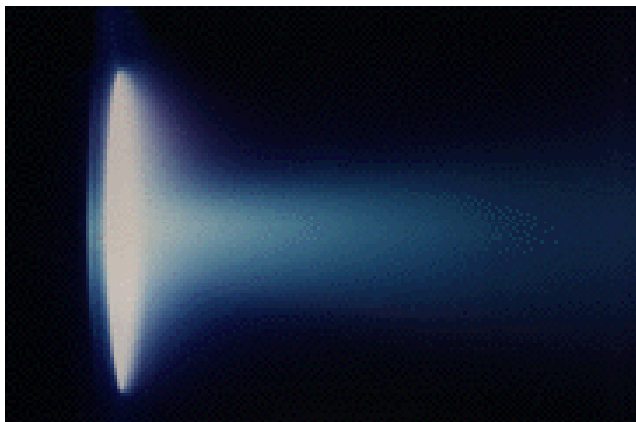
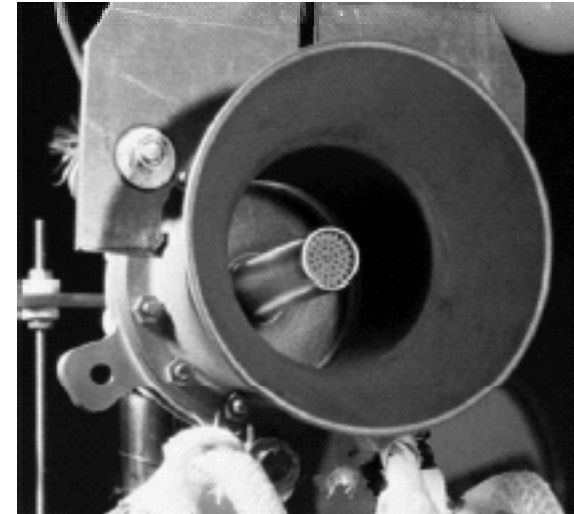
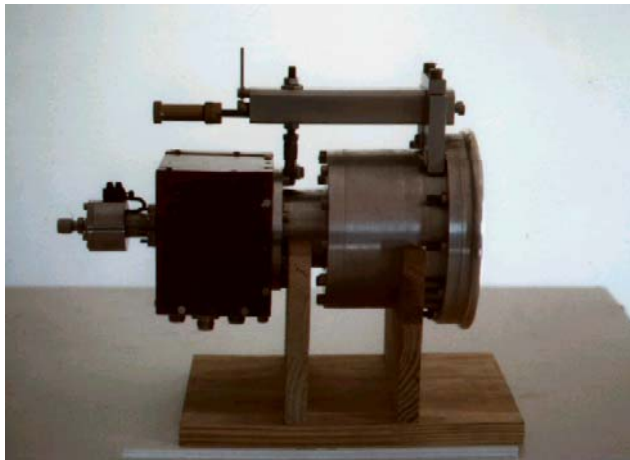
- ▶ Ampia campagna di sperimentazione in regime quasi stazionario ( $>350 \mu\text{sec}$ )
- ▶ I propellenti tipici sono gas nobili (Argon e Xenon) e in tempi recenti il Litio (ridotta erosione del catodo e miglioramento dell'efficienza  $>48\%$  )
- ▶ Potenze anche  $>1 \text{ MW}$
- ▶ Esperienza di volo molto ridotta
- ▶ Sistema promettente per missioni che richiedono elevati livelli di spinta, ad esempio per l'esplorazione dello spazio profondo o per viaggi interplanetari



# Propulsione elettromagnetica

---

## Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

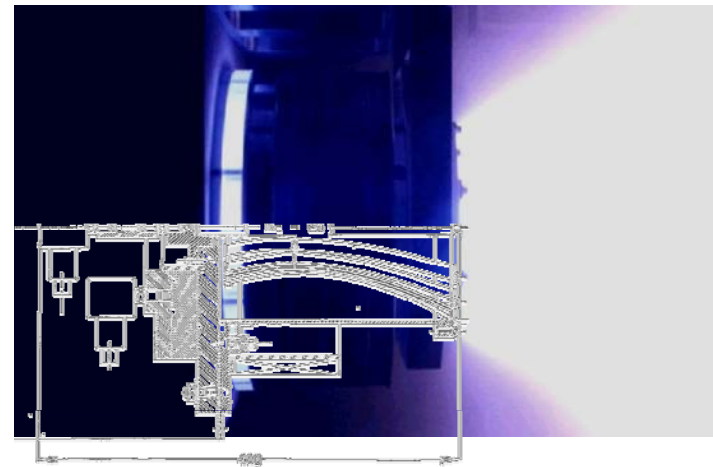
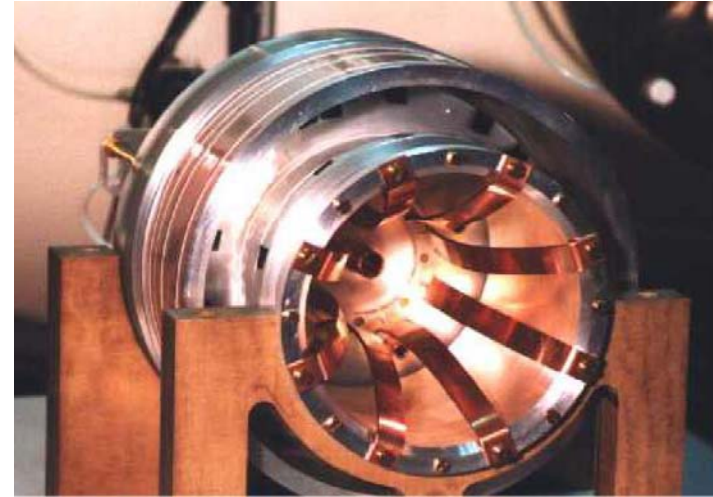


# Propulsione elettromagnetica

---

## Il Motore MPD a campo applicato

- ▶ All'esterno della camera di accelerazione è posto un avvolgimento coassiale al motore che ne migliora l'efficienza.
- ▶ Effetto di schermatura delle pareti e conseguente aumento della vita operativa
- ▶ Possibilità di sfruttare la conformazione ad ugello magnetico per regolare la caduta di potenziale all'anodo e l'accelerazione del plasma
- ▶ Le prestazioni del motore risultano comunque deteriorate da instabilità della colonna di plasma (modo di kink)



# Scelta del propellente

- ▶ Per ridurre le perdite di potenza dovute alla ionizzazione del propellente rispetto alla potenza utile si considera il rapporto

$$\frac{P_{ioniz}}{P_{useful}} \approx \frac{\gamma \epsilon_i}{\frac{1}{2} m_i V_{sp}^2}$$

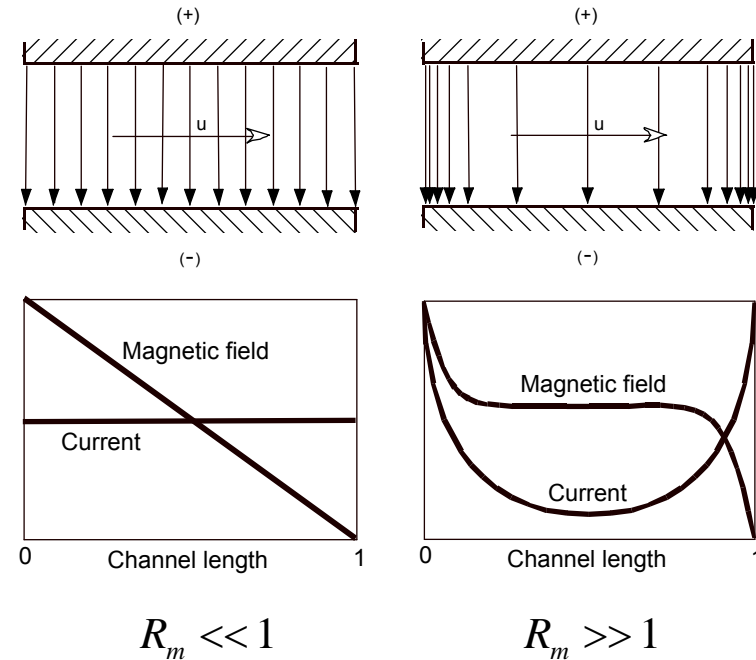
- ▶ A parità di velocità di scarico il fattore conta il rapporto fra l'energia di ionizzazione e la massa atomica del propellente.
- ▶ Bisogna considerare altri fattori:
  - ▶ Contaminazione del veicolo
  - ▶ Difficoltà di stoccaggio
  - ▶ Erosione degli elettrodi

Propellant	$\epsilon_i$ [e.V]	$m$ [u]	$\epsilon_i/m$
Cs	3.9	132.9	0.029
Li	5.9	6.9	0.855
Bi	7.3	209.0	0.035
Hg	10.4	200.6	0.052
Xe	12.1	131.3	0.092
H	13.6	1.0	13.600
Kr	14.0	83.8	0.167
Ar	15.8	39.9	0.396

# Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico

## Il ruolo del numero di Reynolds magnetico

- ▶ Invece di distribuirsi uniformemente le correnti tendono a concentrarsi in corrispondenza delle zone di ingresso e uscita.
- ▶ La rilevanza di questo fenomeno è espressa dal numero di Reynolds magnetico, che rappresenta il rapporto fra gli effetti convettivi e quelli diffusivi del campo magnetico. Se  $R_m \gg 1$  il campo magnetico non riesce a diffondere e la corrente si concentra in aree del canale il cui spessore è dell'ordine di  $1/R_m$



$$R_m = \sigma \mu v L_c$$

$\sigma$  = electrical conductivity

$\mu$  = magnetic permeability

$v$  = flow velocity

$L_c$  = characteristic length

# Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico

---

## Il ruolo del numero di Reynolds magnetico

- ▶ Assumendo come limite la perfetta conducibilità  $E = uB$  si ha:

$$uB = \frac{u\mu I}{2\pi r_a} \qquad E = \frac{V}{h} = \frac{RI}{h} = \frac{1}{\sigma} \frac{h}{2\pi r_a \bar{L}} \frac{I}{h}$$
$$= \frac{I}{\sigma 2\pi r_a \bar{L}}$$
$$\frac{u\mu I}{2\pi r_a} = \frac{I}{\sigma 2\pi r_a \bar{L}}$$

- ▶ Da queste relazioni si ricava  $\bar{L} = \frac{1}{\sigma \mu u}$
- ▶ Ricordando la definizione  $Re_m = \sigma \mu u L_c$  si ottiene perciò

$$\frac{\bar{L}}{L_c} = \frac{1}{Re_m}$$

