

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 Δv 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 η 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 :

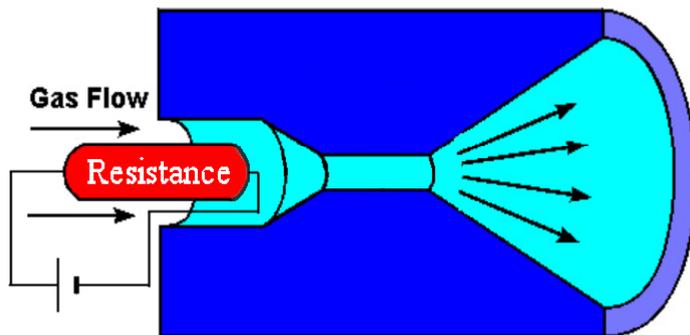
$$v_e \approx \sqrt{2qV/M} \quad V = \text{differenza di potenziale elettrico}, \\ q = \text{carica degli ioni}, M = \text{peso atomico}$$

- ▶ **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.

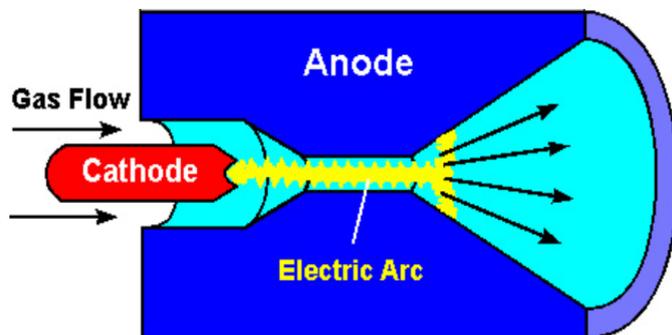


Propulsione elettrotermica

Resistogetto



Arcogetto

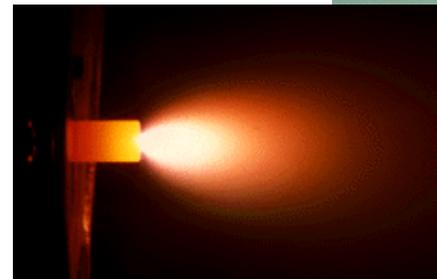
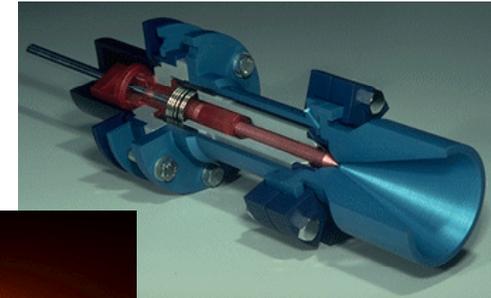
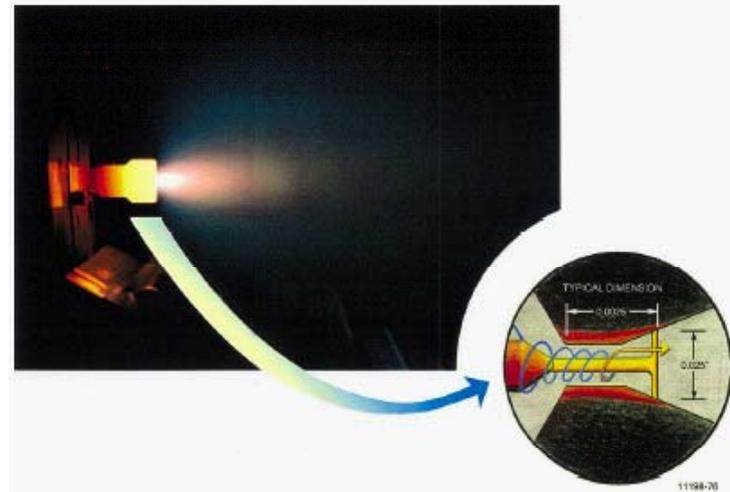


- ▶ Il gas viene accelerato attraverso un processo di carattere termodinamico
- ▶ La scelta del propellente non è vincolata da processi di combustione.
- ▶ Sono preferibili gas a basso peso molecolare e alto calore specifico (idrogeno, ammoniaca, idrazina)
- ▶ Resistogetto: il riscaldamento avviene per 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

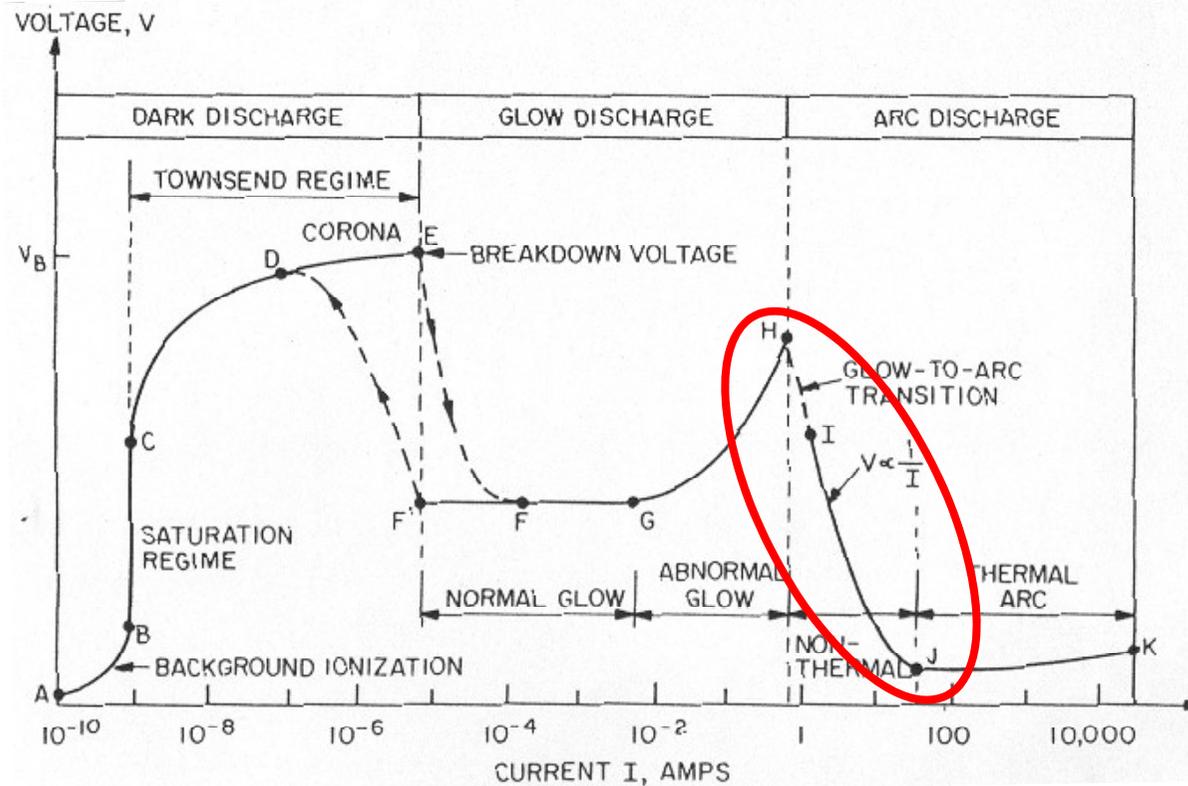


Arcogetto

- ▶ 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

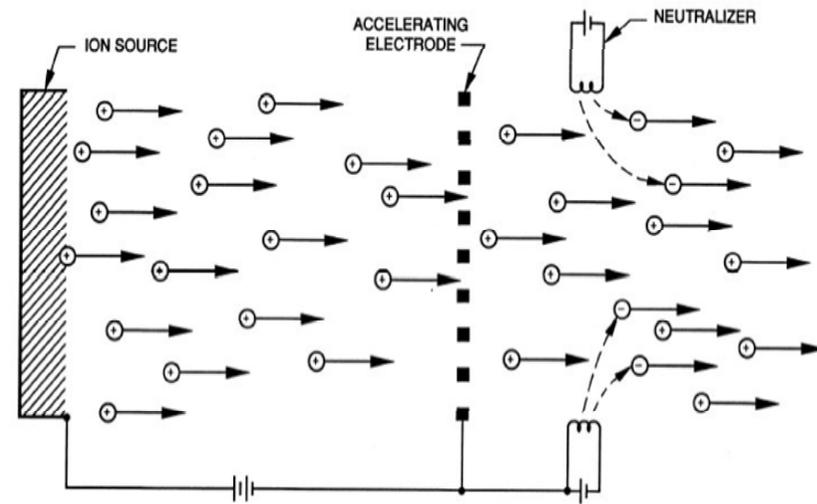


- ▶ Dato che la funzione $V-I$ per la scarica ha pendenza negativa, è necessario un sistema di controllo della potenza per evitare instabilità

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:



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

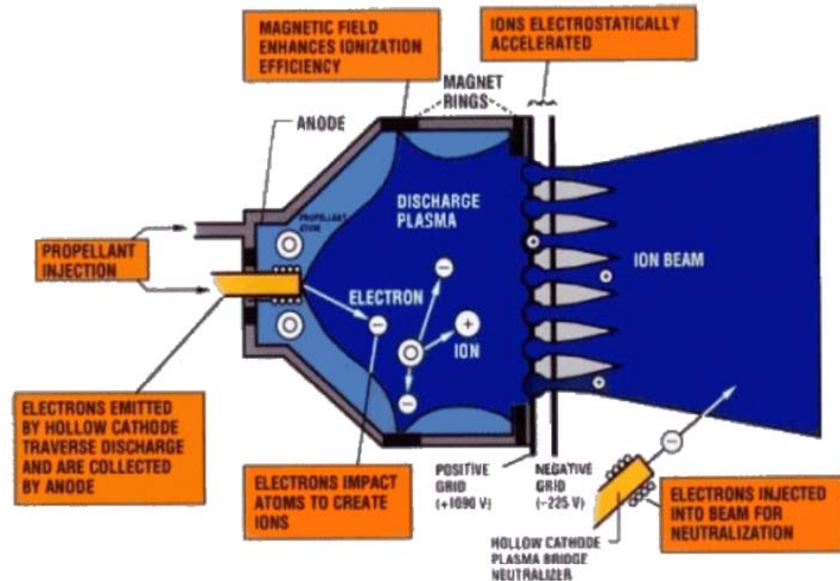
$$j = \frac{4\epsilon}{9} \left(\frac{2q}{M} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{d^2},$$

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

Propulsione elettrostatica

Descrizione delle sorgente

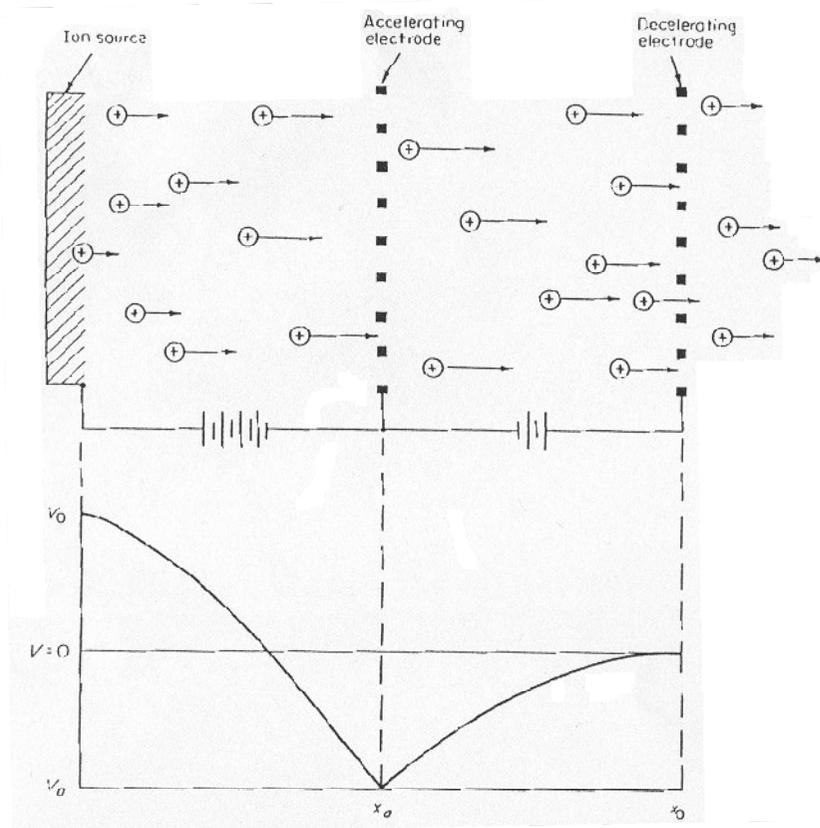
- ▶ Il propellente viene iniettato nella camera e ionizzato per bombardamento elettronico:
 - ▶ Il catodo centrale emette elettroni;
 - ▶ L'anodo è costituito dalle pareti della camera di ionizzazione;
 - ▶ Per aumentare l'efficacia della ionizzazione il moto verso l'anodo degli elettroni è rallentato 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

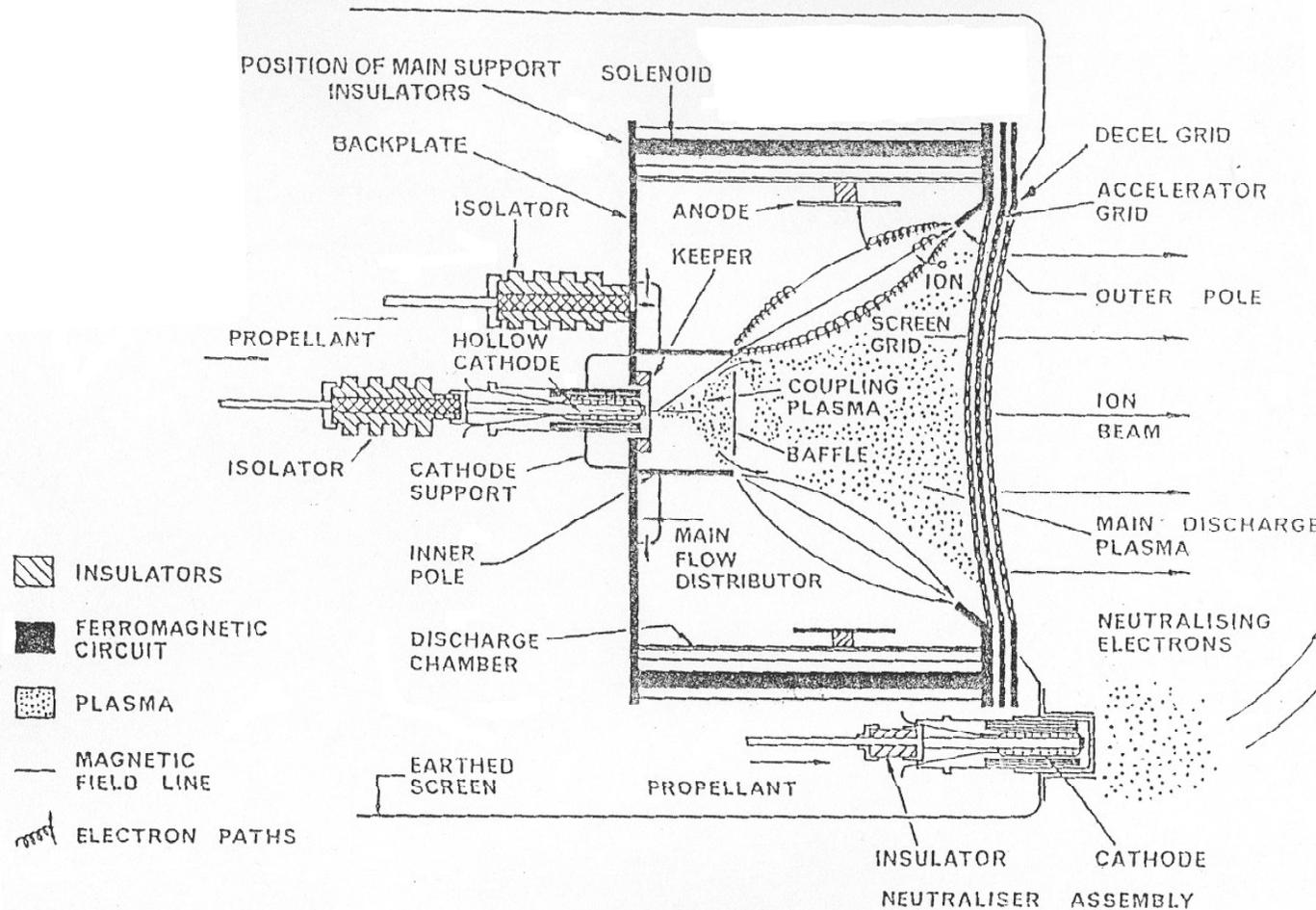
Descrizione delle griglie

- ▶ 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



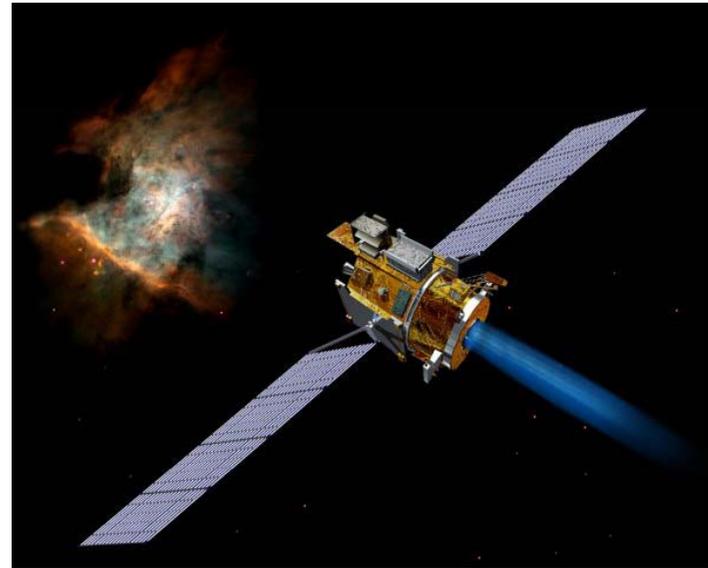
Propulsione elettrostatica

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.



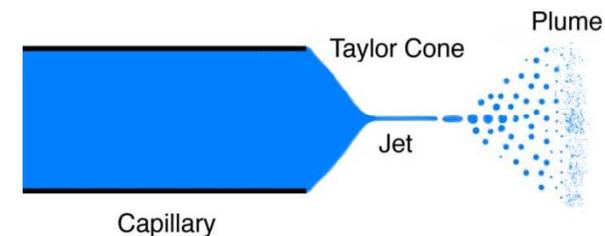
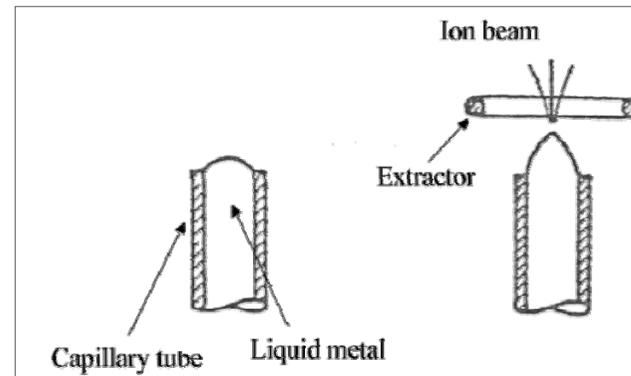
Propulsione elettrostatica

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 γ è la tensione superficiale e r il raggio di curvatura.

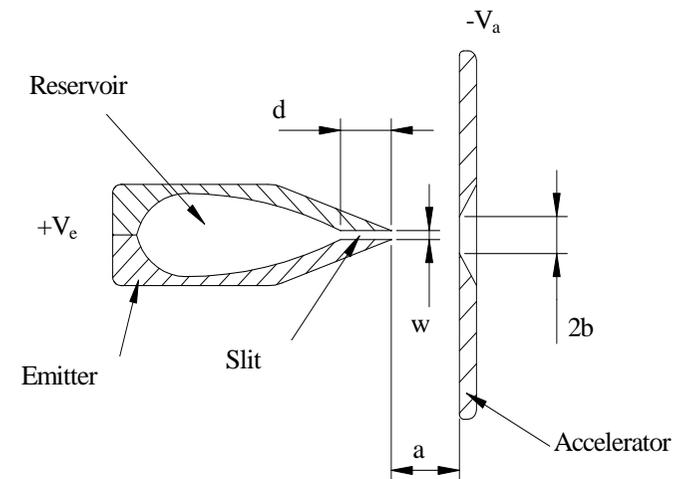
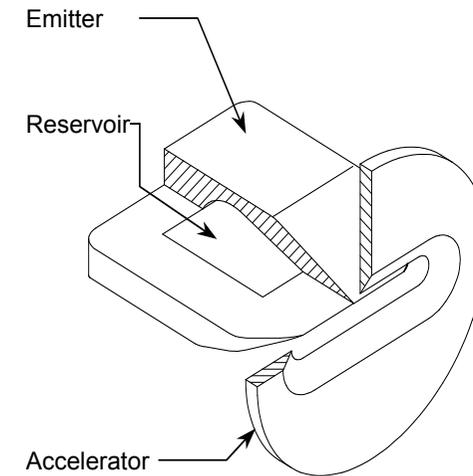


- Considerando la superficie del liquido equipotenziale e aumentando l'intensità del campo elettrico la superficie tende a formare un cono di angolo fissato ≈ 98.6 deg (cono di Taylor). Sperato un valore critico all'estremità del cono si forma un getto di particelle cariche.

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.



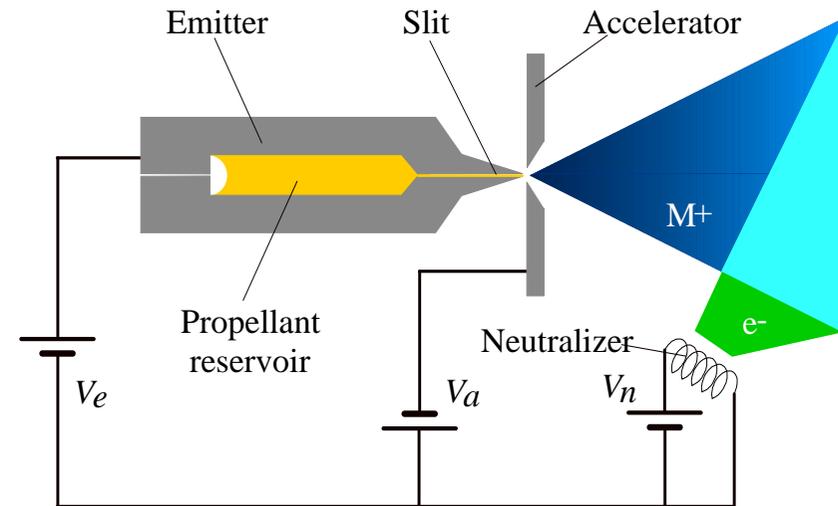
Propulsione elettrostatica

Il Motore ad Emissione di Campo (FEEP)

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

ed è di solito $> 60.000 \text{ m/s}$

- ▶ 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

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

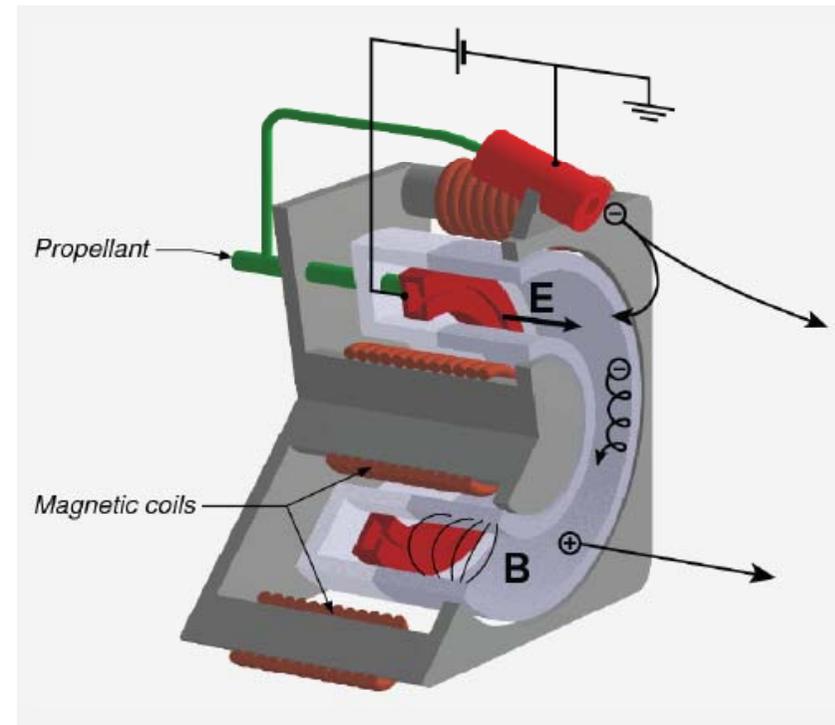
- ▶ Vale l'ipotesi di quasi-neutralità (escluse regioni di dimensioni ridotte rispetto a quella caratteristica del motore).
- ▶ Densità di spinta molto maggiori dei propulsori elettrostatici.
- ▶ Grande varietà di configurazioni possibili:
 - ▶ I campi applicati e le correnti possono essere stazionari, 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)

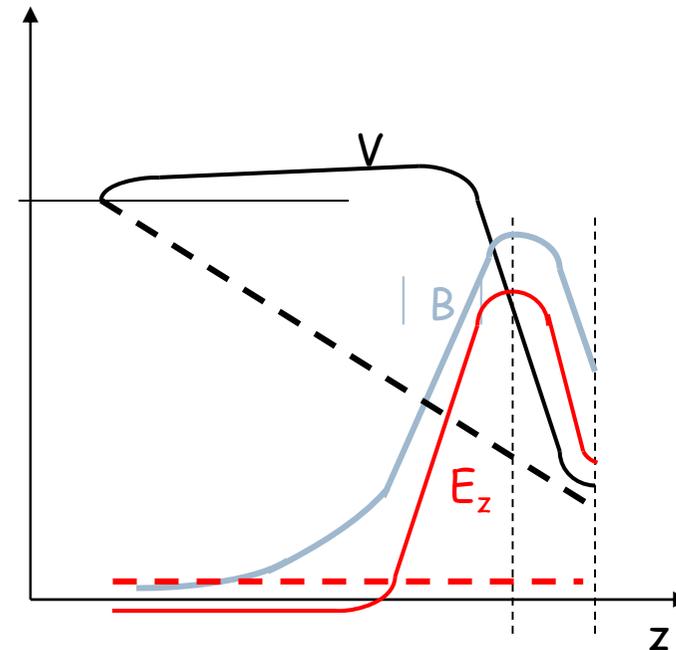
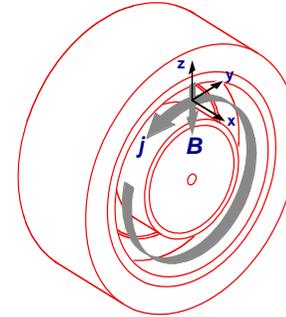
- ▶ Affinchè un motore a effetto Hall funzioni correttamente bisogna che si abbia una densità del plasma sufficientemente bassa e un forte campo magnetico.
- ▶ In queste condizioni la corrente che ne deriva è prevalentemente in direzione $E \times B$ (effetto Hall)
- ▶ Le dimensioni tipiche della zona 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.

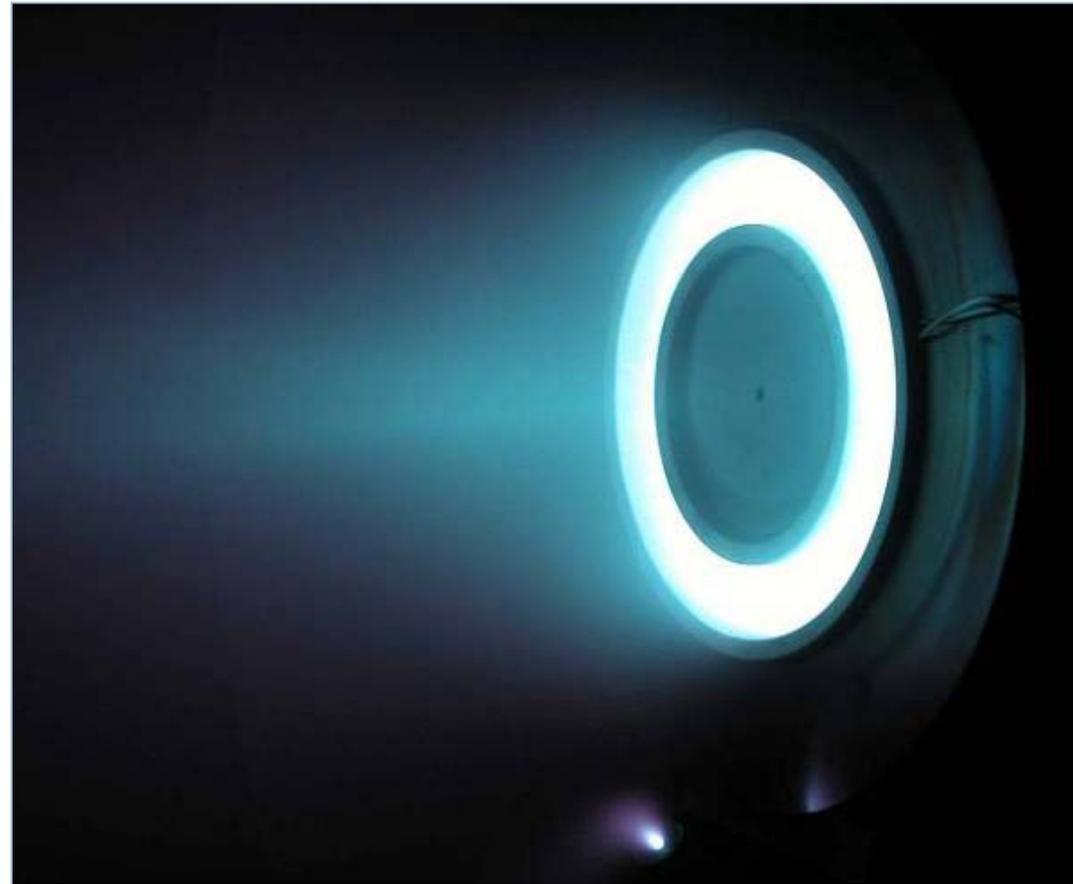


Propulsione elettromagnetica

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

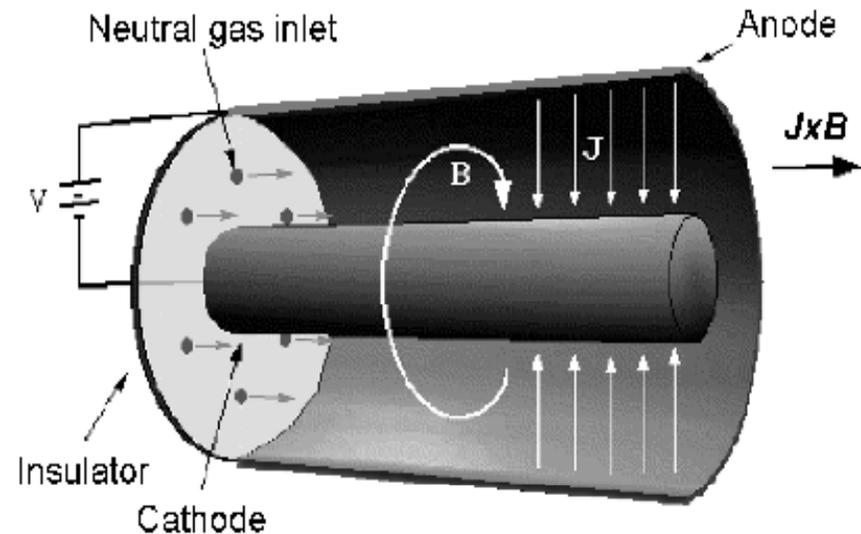
- ▶ Divergenza del getto relativamente ampia, fra 30 e 40 gradi



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)

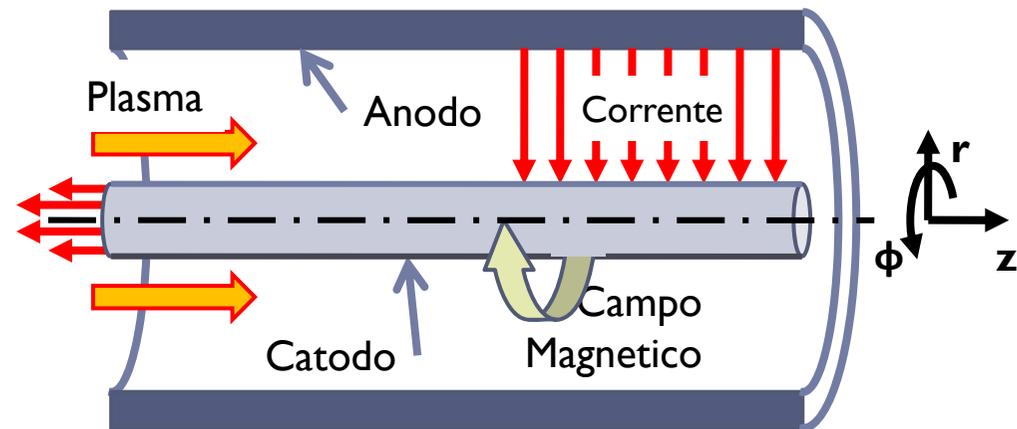
- ▶ Integrando la forza di Lorentz su tutto il volume del canale si ottiene:

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

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

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

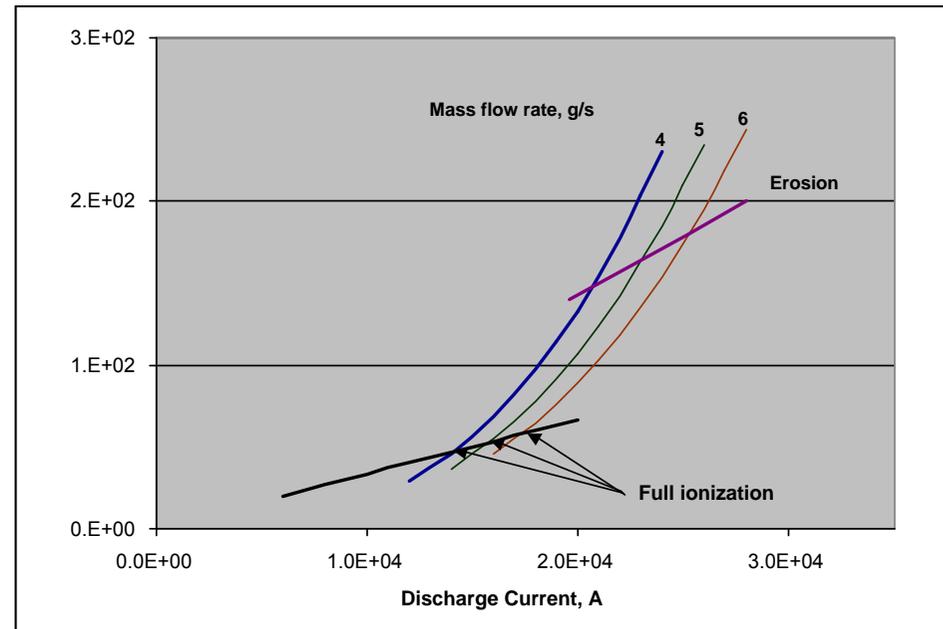
Dato che $T \approx m \Delta v$, si ottiene una caratteristica tensione-corrente di tipo cubico.



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_{crit} = Alfven critical speed

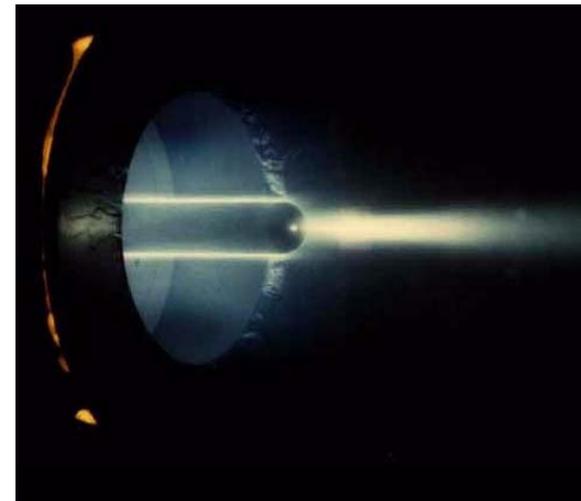
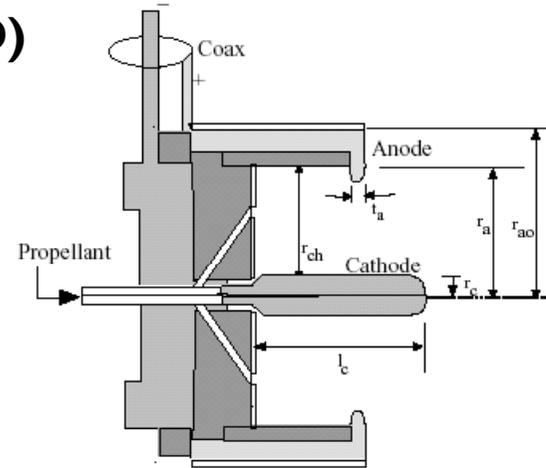
Φ_i = propellant ionization potential

M = propellant atomic mass

Propulsione elettromagnetica

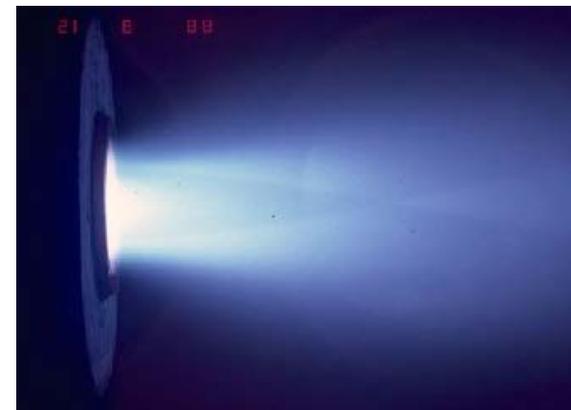
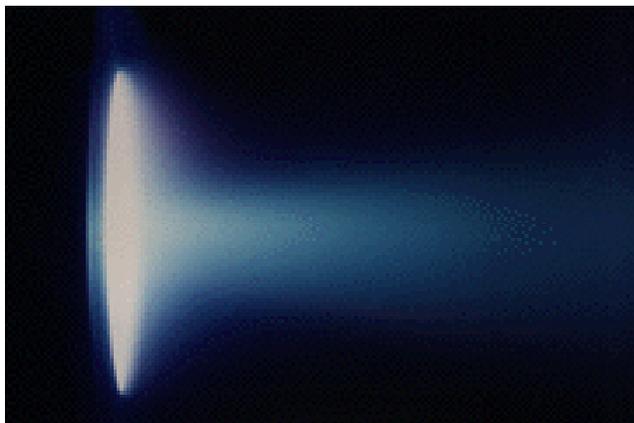
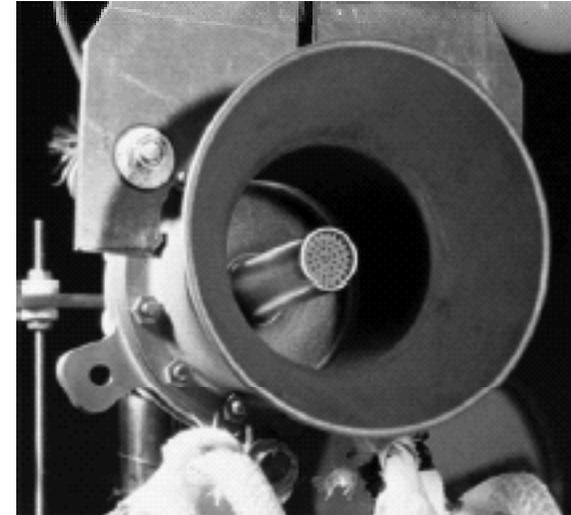
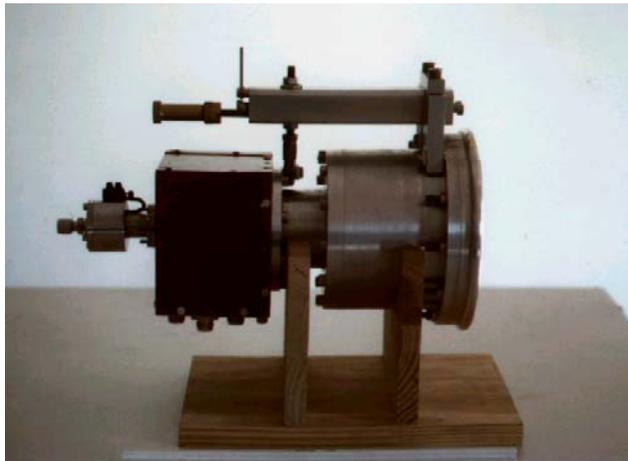
Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)

- ▶ 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

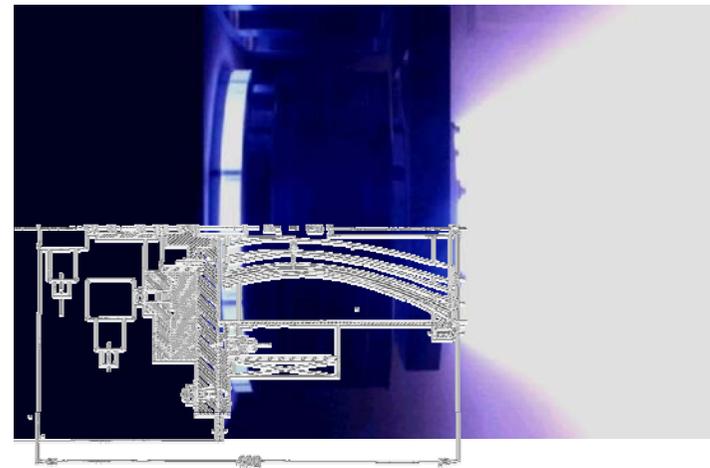
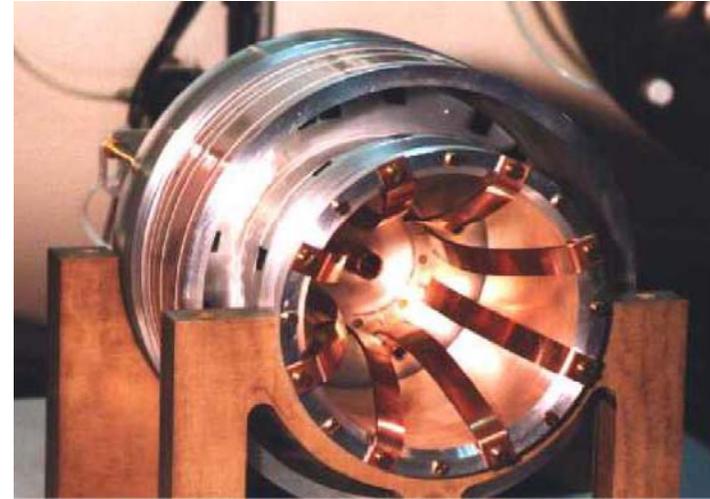
Il Motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD)



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

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

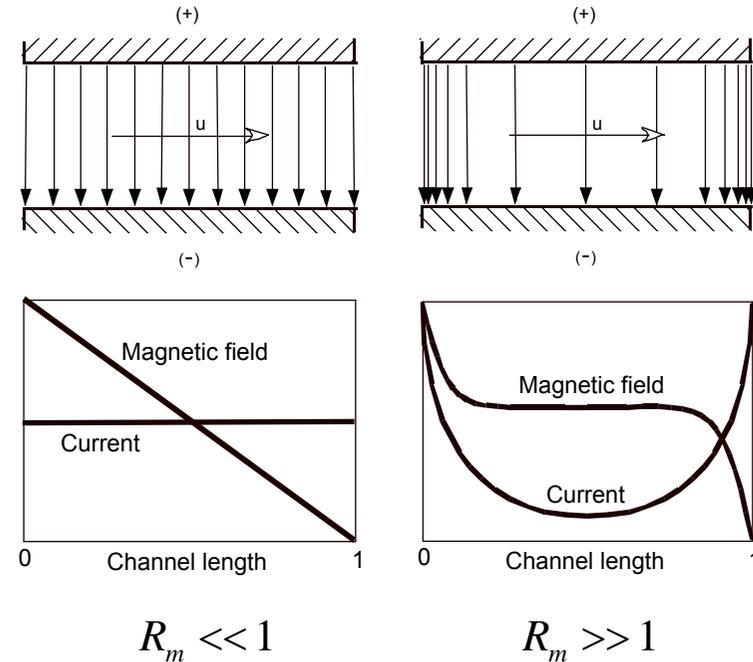
- ▶ A parità di velocità di scarico il fattore conta il rapporto fra l'energia di ionizzazione e la massa atomica del propellente.
- ▶ Bisogna considerare altri fattori:
 - ▶ Contaminazione del veicolo
 - ▶ Difficoltà di stoccaggio
 - ▶ Erosione degli elettrodi

| Propellant | ϵ_i [e.V] | m [u] | ϵ_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 $1/R_m$



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

σ = electrical conductivity

μ = magnetic permeability

v = flow velocity

L_c = characteristic length

